

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství 224

Kombinovaná výstavba portálových úseků tunelů

Combined Construction of Portal Section of Tunnels

Student:

Katarína Sobolová

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Katarína Sobolová**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Kombinovaná výstavba portálových úseků tunelů**
Combined Construction of Portal Sections of Tunnels
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1, Úvod
- 2, Zajištění tunelových portálů
- 3, Rešerše nestabilit portálů tunelů
- 3, Kombinovaná výstavba podzemního díla, metoda želva
- 4, Porovnání stability svahu pro dva způsoby zajištění portálů
- 5, Zhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5.
Klepsatel, F. a kol. *Městské podzemní stavby*. Bratislava: Jaga Group, 2005, 286 s. ISBN: 80-8076-021-7.
Turček, P., Hulla, J. *Zakladanie stavieb*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN: 80-88905-99-0.
Abramson, L. W. at al. *Slope stability and stabilization methods*. USA: 1995. ISBN: 0-471-10622-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

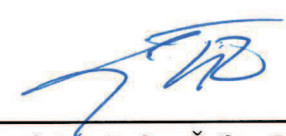
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2016

Datum odevzdání: 02.05.2017


doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu vrátane príloh vypracovala samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedla som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave

.....

podpis študenta

Prehlasujem:

- bola som zoznámená s tým, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Zb. – autorský zákon, najmä § 35 – použitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a použitie diela školského a § 60 – školské dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) ma právo nezárobkovo ku svojej vnútornej potrebe využiť bakalársku prácu (§ 35 odst. 3).
- súhlasím s tým, že údaje o bakalárskej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bolo zjednané, že použiť svoje dielo – bakalársku prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem iba so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO vytvorením diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej bakalárskej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Zb, o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok obhajoby.

V Ostrave

.....

podpis študenta

PodĎakovanie

Rada by som poĎakovala svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Lukášovi Ďurišovi, Ph.D. za odborné vedenie, pomoc a rady pri spracovaní tejto práce.

Anotácia bakalárske práce:

V bakalárskej práci sa budem zaoberať kombinovanou výstavbou portálových úsekov tunelov. Teoretická časť poskytuje prehľad o rôznych spôsoboch zabezpečenia stability tunelových portálov, rovnako ako rešerši nestabilit portálov tunelov na konkrétnych príkladoch zo Slovenska, Česka a Srbska. Ďalej sa zaoberám problematikou kombinovanej výstavby podzemných diel. Konkrétne jedným z druhov vrchnákovej metódy, ktorý využíva konštrukciu vrchnáku v tvare klenby ako konštrukciu primárneho ostenia a na zabezpečenie stropu, pod ktorým prebieha samotné razenie tunela. Pre úplnosť sú uvedené aj ďalšie metódy realizácie podzemných diel. Praktická časť rieši výpočet stability svahu pre dva spôsoby zaistenia portálov v programe GEO5. Prvý spôsob spočíva vo vyhlbení stavebnej jamy až na dno tunela. Druhý spôsob rieši vyhlbenie stavebnej jamy po úroveň konštrukcie klenby, ktorá prispieva k zaistieniu stability. Záver práce hodnotí porovnanie dvoch spôsobov zabezpečenia stability svahu.

Kľúčové slová:

portál tunela, podzemné dielo, razenie, korytnačka, klenba, stavebná jama

Anotation:

The aim of this bachelor thesis is to discuss the construction of a combined portal tunnel sections. The theoretical part gives an overview of the various ways of ensuring the stability of tunnel portals as well as a search of instabilities of tunnel portals with particulars examples from Slovakia, Czech Republic and Serbia. Further, we deal with the problems in combined construction of underground structures. Specifically, one of the kinds of cut-and-cover methods is the top-down method which uses the arched construction as a construction of a primary lining to secure the ceiling beneath which the excavation takes place. For completeness, there are given other methods of execution of underground construction. The practical part refers to a calculation of slope stability for two ways of securing portals in program GEO5. The first approach consists in excavation of construction pit to the tunnel invert. The second technique falls into an excavation of construction pit to the level of the arch construction which contributes to ensure the stability. The conclusion evaluates the comparison of two methods to secure the stability of the slope.

Key words:

tunnel portal, underground structure, driving, top-down construction, arch, construction pit

Zoznam použitého značenia

E_{def}	deformačný modul [MPa]
SF	stupeň stability
X_i	šmyková sila medzi blokmi [kN]
c	súdržnosť [kPa]
d	priemer [m]
γ	objemová hmotnosť zeminy/horniny [kN/m ³]
φ	uhol vnútorného trenia [°]
ν	Poissonovo číslo [-]

Ostatné značky a skratky sú vysvetlené v texte.

Obsah

1. Úvod	9
2. Charakteristika portálov	10
3. Zaistenie tunelových portálov	11
3.1. Svahované stavebné jamy	11
3.2. Odvodnenie svahu.....	11
3.2.1. Povrchové odvodnenie	12
3.2.2. Hĺbkové odvodnenie.....	12
3.3. Záporové paženie	13
3.4. Pilótová stena.....	14
3.4.1. Predvrtané pilóty	15
3.4.2. Pilóty bez medzier	15
3.4.3. Pilóty s medzerami	15
3.4.4. Voľne stojace pilóty	16
3.4.5. Kotvené pilóty	16
3.4.6. Piliere z tryskovej injektáže.....	17
3.5. Mikropilótové steny	18
3.6. Podzemné steny	20
3.7. Horninové kotvy	20
3.8. Klincovanie hornín	21
4. Rešerše nestabilít portálov tunelov.....	23
4.1. Tunel Prackovice – Pražský portál	23
4.2. Tunel Klimkovice – oblasť portálu stavebnej jamy Brno.....	25
4.3. Tunel Višňové – západný portál	26
4.4. Tunel Žilina – západný portál	27
4.5. Tunel Čebrot – západný portál	28
4.6. Tunel Bancarevo – západný portál	29

5.	Kombinovaná výstavba podzemných diel.....	31
5.1.	Rozdelenie metód výstavby podzemných diel.....	31
5.2.	Vrchnáková metóda výstavby.....	32
5.3.	Metóda „korytnačka“	33
6.	Návrh zabezpečenia stavebnej jamy v oblasti portálu.....	35
6.1.	Metodika posúdenia.....	35
6.2.	Spôsob modelovania šmykovej plochy.....	36
6.3.	Charakteristika prostredia a materiálov	37
6.4.	Prvý spôsob zabezpečenia.....	38
6.4.1.	Postup výpočtu	38
6.4.2.	Pravý svah	39
6.4.3.	Ľavý svah.....	41
6.5.	Druhý spôsob zabezpečenia.....	44
6.5.1.	Postup výpočtu	44
6.5.2.	Konštrukcia klenby.....	45
6.5.3.	Pravý svah	45
6.5.4.	Ľavý svah.....	48
6.6.	Porovnanie stability svahu pre dva spôsoby zaistenia portálu.....	50
7.	Záver.....	53
8.	Zoznam použitej literatúry.....	55
9.	Zoznam obrázkov	57
10.	Zoznam tabuliek	58
11.	Zoznam príloh	59

1. Úvod

Výstavba tunelov patrí do jednej z najťažších, najzaujímavejších ale tiež k najnákladnejším úlohám podzemného staviteľstva. Ide o líniové podzemné dielo, ktoré sa buduje v horninovom prostredí. Jeho návrh a samotnú realizáciu ovplyvňujú geologické podmienky.

Podľa účelu rozdeľujeme tunely na dopravné, ktoré slúžia na cestnú a koľajovú dopravu, komunálne a vodohospodárske. Tunely používame predovšetkým k prekonávaní prekážok alebo z nedostatku miesta na povrchu. Najstaršie tunely sa stavali hlavne pre účely zavlažovania. Jednými z prvých staviteľov tunelov boli Rimania, ktorí využívali tunely ku spojeniu akvaduktov privádzajúcich vodu do miest.

K základným projekčným prvkom patrí priečny prierez, pozdĺžny rez a smerové vedenie tunela. Práve smerové vedenie tunela je jedným z dôležitých parametrov pri voľbe umiestnenia portálovej časti. Návrh si vyžaduje zvýšenú pozornosť už v prípravných fázach projektu. Pokiaľ nie je na návrh umiestnenia kladený dostatočný dôraz, často sa stretávame s rôznymi problémami stability priportálových zárezov tunelov.

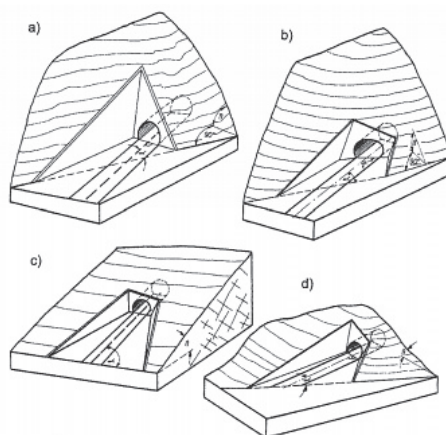
Veľká variabilita výskytu hornín, anomálie a poruchové zóny, v súvislosti s nižšími pevnostnými charakteristikami kladú zvýšené nároky na statické zabezpečenie priportálových úsekov a samotných portálov tunelov. Práve k zvýšeniu stability môže byť využívaná kombinovaná výstavba portálov tunelov. Hlavná charakteristika metódy spočíva vo vyhlbení stavebnej jamy, osadení stropnej konštrukcie a následnom razení, už pod ochranou tejto konštrukcie. Pri použití metódy „korytnačka“ sa k zlepšeniu stability využíva práve klenbový tvar, ktorý vytvára staticky trojkľbový oblúk necitlivý na deformáciu podpor. Uplatňuje sa taktiež pre plytké tunely, kde hrozí prelomenie nadložia s ohľadom na klasické razenie. Z ekonomického hľadiska je výhodná kvôli úspore zemných prác, súvisiacich s odťažiením zeminy.

Táto práca sa upriamuje na použitie kombinovanej metódy výstavby na zabezpečenie svahu portálu tunela. Hlavná úloha spočíva v porovnaní dvoch spôsobov zabezpečenia portálu a vyhodnotení pôsobenia klenby v súvislosti so zvýšením stupňa stability.

2. Charakteristika portálov

Prechod medzi pozemnou a podzemnou časťou komunikácie sa uskutočňuje cez portál tunela. Je to rovnako aj oblasť, z ktorej prebieha razenie tunela ešte vo fáze jeho výstavby.

Samotný portál tunela býva takmer pravidelne osadený do priportálového zárezu. Portály môžu byť smerované kolmo alebo šikmo ku svahu (Obr. 1). Pri šikmom smerovaní komunikácie do svahu, je nutné rátať so zaťažením horninovým tlakom a prípadnými svahovými pohybmi, ktoré pôsobia zboku.



Obrázok 1 Príklady usporiadania portálov [4]

- a) kolmý portál pri strmom svahu, b) šikmý portál pri strmom svahu, c) kolmý portál takmer kolmému vstupu pri miernom sklone svahu, d) kolmý portál pri šikmom vstupe a miernom sklone svahu

Zhotovenie začiatku tunelovej trúby v otvorenej stavebnej jame technológiou hĺbenia je v prípade, ak to umožňujú priestorové a geologické podmienky výhodnejšie ako s použitím baníckych technológií. Pomyslená hranica ekonomickej efektívnosti výšky nadložia, pri ktorej je ešte stále výhodné hĺbenie, sa niekedy pohybuje aj nad hranicou 20 m.

V niektorých prípadoch bývajú do portálového objektu zabudované aj technické zariadenia, ktoré zabezpečujú prevádzku ako napríklad trafostanica, strojovňa ventilátorov, riadenie prevádzky v tuneli a pod. Dnešná doba prináša čoraz väčšie požiadavky spojené nielen s inžinierskym návrhom ale rovnako požiadavky na architektonické riešenie. [4]

3. Zaistenie tunelových portálov

Portálové úseky patria k jednej z najnáročnejších etáp výstavby cestných a železničných tunelov. Umiestnenie portálu tunelu a jeho napojenie na vedenie komunikácie by sa malo usmerniť tak, aby zárez obchádzal poruchové zóny horninového masívu, oblasti s výskytom rôznych anomálií a nerealizoval sa v oblastiach postihnutých alebo náchylných na svahové pohyby. Nakoľko sa portály často umiestňujú do oblastí, v ktorých sú obsiahnuté menej kvalitné horniny a prítomné rôzne defekty horninového masívu, využívajú sa pri zabezpečení svahov rozličné metódy. [4], [7]

3.1. Svahované stavebné jamy

Svahované stavebné jamy sa navrhujú v oblastiach, kde je dostatok priestoru na vytvorenie strmého svahu, ktorý však vyhovuje z hľadiska požadovanej stability bez ďalších úprav. Ide o ekonomickú variantu výstavby, ktorá sa však pri zhotovovaní tunelových portálov samostatne skoro vôbec nevyužíva, nakoľko pre vytvorenie svahovanej jamy nie je dostatok priestoru. V takých prípadoch sa však využíva možnosť kombinácie svahovanej a paženej jamy.

Rovnako je možnosť pretvorenia pôvodne stabilného svahu na nestabilný až po niekoľkých rokoch, s čím sa môžeme stretnúť najmä pri neogénnych íloch alebo v lokalitách tvorených flyšovými horninami, kde k povrchu vystupujú ílovce. [2], [4]

3.2. Odvodnenie svahu

Pri zabezpečovaní stability patrí odvodnenie k najčastejšie používaným zákrokom. Hlavnou príčinou nestability svahu je pôsobenie povrchovej a podzemnej vody. Zachytenie a odvedenie povrchovej vody patrí k základným opatreniam zvýšenia stability svahu, vo väčšine prípadov však ako samostatná metóda nepostačuje. [4], [6]

Hlavnou funkciou je odvedenie vody z povrchu, ktorý je napríklad v dôsledku zemných prác poškodený vznikom trhlín a nechránený pred prenikaním povrchovej a zrážkovej vody. [4]

3.2.1. Povrchové odvodnenie

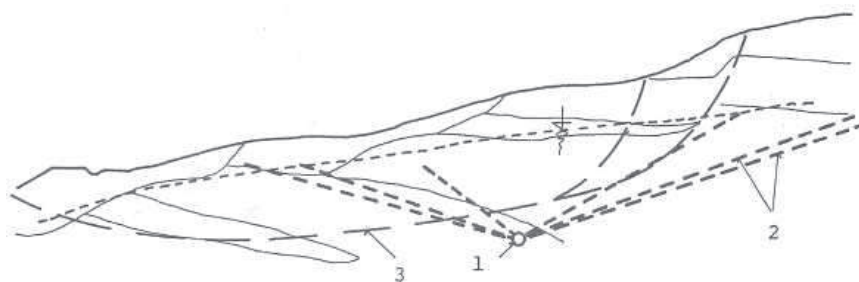
Presakujúca voda v päte svahu je zachytávaná systémom odvodňovacích rigolov a otvorenými priekopami, ktoré sa zvyčajne zhotovujú z malých prefabrikovaných tvárnic. Inou možnosťou je zachytenie prameňov v korune svahu, ktoré sa musia odvieť mimo rizikové územie pomocou potrubia brániaceho nadmernému nasýteniu zemín vodou na svahu. Umelé prostriedky odvodnenia musia byť pravidelne kontrolované.

Trávnatý povrch územia poskytuje prirodzenú tesniacu vrstvu, ktorú je možné využiť v priebehu zemných prác a až pri jej odstránení pristúpiť k protieróznej ochrane. [4], [6]

3.2.2. Hĺbkové odvodnenie

Hĺbkové odvodnenie slúži na zníženie tlakového účinku vody prostredníctvom vertikálnych a šikmých odvodňovacích vrtov, štrkových pilot, drenážnych trubiek, čerpacích studní alebo drenážnymi štôľňami. [6]

Najviac používanou metódou je systém odvodňovacích vrtov (Obr. 2), ktorých dosah do priepustnej vrstvy zabezpečí dokonalé odvodnenie. U vrtov dlhších ako 50 m sa predpokladá odchýlenie od projektovaného smeru, preto sa navrhujú tzv. vejáre odvodňovacích vrtov nasmerované do najpriepustnejšieho horizontu, z ktorých sa voda zbiera do odvodňovacej studne a následne sa odvádza. Účinnosť vrtov sa dá zvýšiť vybudovaním štrkových pilot v podmienkach, kde nie sú presne určené vodonosné horizonty. Prínosom je zvýšenie stability svahu posilnením pasívnej zložky síl v statickej schéme. Plnia teda nie len drenážnu, ale aj stabilizujúcu funkciu. Ako výplň sa používa balvanitý materiál, drvený alebo kopaný štrk. Prechod medzi pôvodnou horninou a štrkovými pilotmi zabezpečuje filtračná vrstva z piesku alebo geotextília. [4]

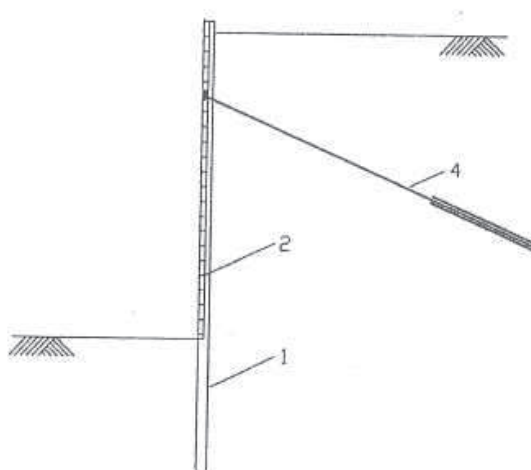


Obrázok 2 Zníženie HPV odvodňovacou štôľňou a vertikálnymi vrtmi [4]

1 - štôľňa, 2 - subhorizontálne odvodňovacie vrti, 3 - klzná plocha

3.3. Záporové paženie

Záporové paženie (Obr. 3) sa používa v súdržných a nesúdržných zeminách, v suchých až vlhkých horninách. Je vhodné k paženiu výkopov, kde sa hladina podzemnej vody nachádza pod dnom výkopu. [6]



Obrázok 3 Schéma záporového paženia [6]

1 - zápora, 2 – pažiny, 3 – kotva

Vo svojej klasickej (popisovanej podobe) ide o zaistenie stavebných jám hlbokých od 5 do 20 m a je to vždy konštrukcia dočasná. Pri portáloch tunelov sa ako dočasná

konštrukcia využíva napríklad pre zaistenie čela svahu v portálovej oblasti pri prieskumnej štôlni, rovnako na zaistenie stability bočných stien výkopu. [4]

Skladá sa zo zvislých nosných prvkov tzv. zápor (spravidla oceľové valcované nosníky profilu I), ktoré sa musia v prostredí tvorenom skalnými horninami vkladať do predvŕtaných otvorov a zvyšný priestor vo vrte sa vybetónuje. Ďalšími prvkami záporového paženia sú pažiny, stabilizačné prvky (kotvy) a prevážky. [6]

Ide teda o dočasné riešenie v závislosti, na ktorom sa musí vybudovať trvalá konštrukcia. Nakoľko ide o konštrukčne a technologicky náročnú metódu používa sa v tomto prípade veľmi zriedka. [4], [6]

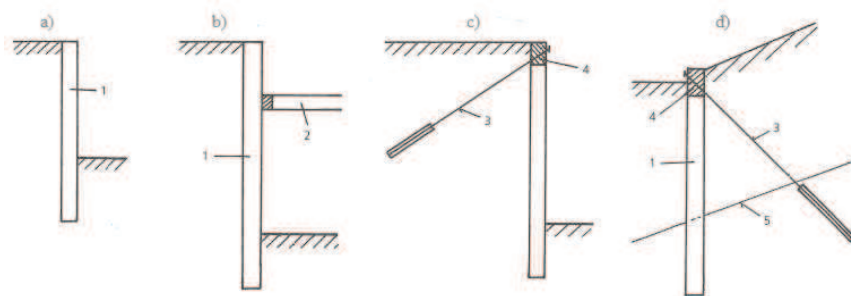
3.4. Pilótovej stena

Jednou z trvalých pažiacích konštrukčných stien je pilótovej stena. Zhotovuje sa spravidla z pilot replacement, to znamená vŕtaných s priemerom do 1,6 m, ktoré dosahujú hĺbku niekoľko desiatok metrov. Vytvorenie zárezu do prírodného svahu takmer pravidelne spôsobuje problémy s výronmi podzemnej vody. [4]

Pilótovej steny nie sú vhodné vo svahoch z ílov, pokiaľ sa svah nad stenou nechráni proti premrzaniu násypom. S účinkom mrazu sa zväčšuje objem zeminy, ktorá prijíma vlhkosť kapilaritou. Napúčanie a zmrašťovanie zemín vytvára trhliny prijímajúce povrchovú vodu, čo je spôsobené cyklami zmrazovania a rozmrazovania. Zemina podlieha pomalej šmykovej deformácií a zosúva sa postupne po svahu. [1], [4]

Vlastnosti horniny ovplyvňujú spôsob usporiadania pilotových stien, rovnako ako spôsob kotvenia a úpravu priestoru medzi nimi.

Z hľadiska statického pôsobenia (Obr. 4) sa votknutá pilótovej stena používa zriedka, pretože ju nie je možné použiť na kotvenie hlbokkej stavebnej jamy. Preto sa v hlbších stavebných jamách používa rozpretie steny, častejšie však jej kotvenie. Vhodné použitie steny je rovnako pri sanácií zosuvov. [1]



Obrázok 4 Statické pôsobenie pilotovej steny [1]

a) votknutá, b) rozopretá, c) kotvená, d) stena stabilizujúca zosuv

1 - pilota, 2 - rozpera, 3 - kotva, 4 - stužujúci veniec, 5 - klzná plocha zosuvu

3.4.1. Predvrtané pilóty

Najlepšie odolávajú pôsobeniu veľkých zemných tlakov. Steny majú vyššiu vodotesnosť. Technológia spočíva prvotne vo vyvrtaní primárnych pilot, ktoré nie sú vystužené. Následne sa medzi ne vrtajú sekundárne vystužené pilóty s presahom, ktoré sú schopné prenášať väčšie ohybové momenty. Zhotovením sekundárnych pilot sa poruší časť betónu primárnych pilot, čím dôjde ku konštrukčnému spojeniu oboch typov (Obr. 5a)). [4]

3.4.2. Pilóty bez medzier

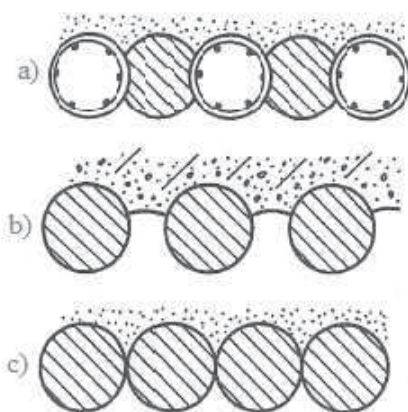
Pokiaľ nehrozia väčšie priesaky vody zhotovujú sa pilóty bez medzier (Obr. 5c)). Každá pilota je vystužená a styk medzi nimi nie je vodotesný. Usporiadanie jednotlivých prvkov vedľa seba zaisťujú tuhosť steny. [4]

3.4.3. Pilóty s medzerami

Pilóty s medzerami (Obr. 5b)) sú najčastejšou technológiou pri zabezpečení stability zárezov. Podľa svojej voľnej výšky bývajú kotvené v jednej alebo vo viacerých úrovniach

pomocou monolitického železobetónového venca, ktorý vzájomne prepája jednotlivé prvky steny a tak zabráňuje ich lokálnemu preťaženiu. Priestor medzi jednotlivými pilótami musí byť vhodným spôsobom odvodnený a zaistený trvalou konštrukciou, najčastejšie striekaným betónom, ktorý môže byť vystužený sieťou.

Kvôli svojej vysokej tuhosti je často používané toto riešenie aj v skalných horninách, ktoré sú po odhalení ohrozované intenzívnym zvetrávaním. [1], [4]



Obrázok 5 Pôdorysné usporiadanie pilótovej steny [1]

a) predvrtávané pilóty, b) s medzerami, c) bez medzier

3.4.4. Voľne stojace pilóty

Navrhujú sa pre voľnú výšku do 5 m, pričom s rastúcou výškou rastie vodorovná deformácia stien, rovnako aj požiadavka na hĺbku ich votknutia pod dno výkopu. Práve preto sa z hľadiska statického pôsobenia navrhujú veľmi zriedka. [1]

3.4.5. Kotvené pilóty

Kotvy slúžia na zachytenie veľkých vodorovných síl. Používajú sa najčastejšie lanové kotvy s dĺžkou niekoľko desiatok metrov tak, aby zaťaženia od tlakov hornín boli zachytené časťou siahajúcou pod potencionálnu šmykovú plochu zosuvu a kotvami.

Rovnako koreň kotvy musí siahať až za aktívnu šmykovú plochu a za oblasť, v ktorej by sa mohol za nepriaznivých podmienok vyvolať aktívny zemný tlak. Steny, ktoré nebudú obnažené na veľkú výšku a do výšky približne 6 m stačí kotviť iba v jednej úrovni. [1], [4]

Zvýšenie statického pôsobenia je možné zviazaním pilot v úrovni hláv a v jednotlivých úrovniach kotvenia s použitím železobetónového venca. Pri väčšom zaťažení sa navrhuje kotvenie vo viacerých úrovniach.

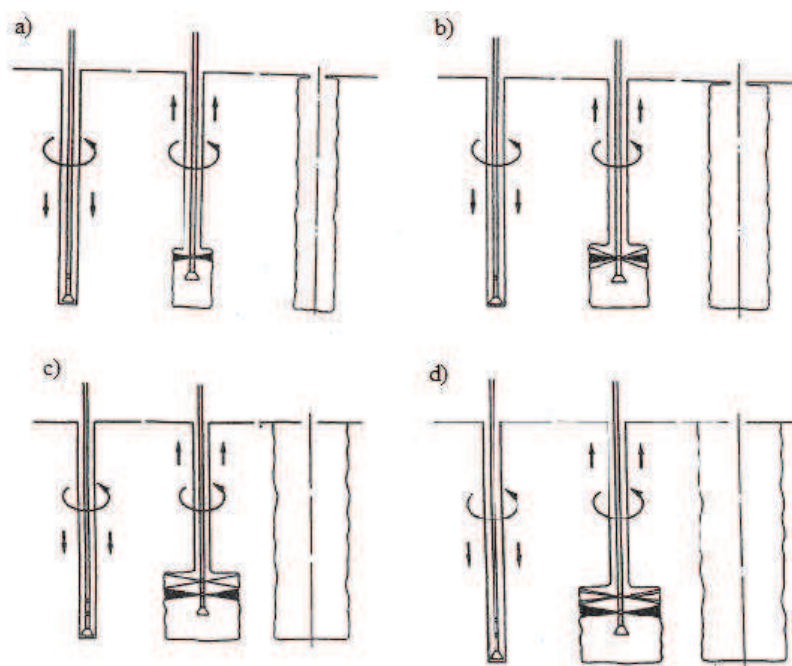
Nie je vhodné použitie rozpier na zadržanie horizontálnych síl, nakoľko vodorovná vzdialenosť protiľahlých stien dosahuje desiatky metrov, čo by spôsobovalo problém pri navrhovaní rozpier na vzper. Ďalším podstatným negatívom je zásah rozpier do prejazdného profilu. [1]

3.4.6. Pilieri z tryskovej injektáže

S touto formou zabezpečenia sa stretávame pomerne krátky čas, nakoľko ide o novšiu technológiu, jej uplatnenie je však čoraz širšie a častejšie. Používajú sa masívnejšie prvky alebo kombinácia s iným druhom zabezpečenia (napríklad mikropilóty), nakoľko nevýhodu pilierov z tryskovej injektáže je pomerne malá ohybová únosnosť, ktorá je určená nízkou ťahovou pevnosťou materiálu a nemožnosťou vystuženia. Tieto riešenia preberajú ťahové sily alebo v prípade masívnejších prvkov nedochádza k ťahovému namáhaniu.

Podľa metódy realizácie môže ísť o jednofázový systém, dvojfázový vzduchový, dvojfázový vodný a trojfázový systém (Obr. 6). Vhodný druh je volený s ohľadom na geotechnické podmienky na stavenisku, taktiež aj s ohľadom na požadované výsledné vlastnosti prvkov z tryskovej injektáže. Rozdiel medzi metódami je v druhu média, ktoré je použité na rozrušovanie a spevňovanie zeminy. Pri jednofázovom systéme ide o rozrušovanie a spevnenie zeminy pomocou jedného média zväčša cementovou suspenziou, ktorá sa vháňa do vrtu pomocou vysokej mechanickej energie. Rozdiel medzi dvojfázovým vzduchovým a vodným systémom je v druhu podporného média, ktoré spolu s paprskom cementovej suspenzie pri vysokej mechanickej energii spevňuje a rozrušuje okolitú zeminu. Trojfázový systém je technológia, pri ktorej je rozrušovanie zeminy

dosiahnuté vysokou mechanickou energiou vodného paprsku za podpory stlačeného vzduchu a spevnenie nastáva oddelením paprsku injekčnej cementovej zmesi. [5]



Obrázok 6 Schéma realizácie tryskovej injektáže [5]

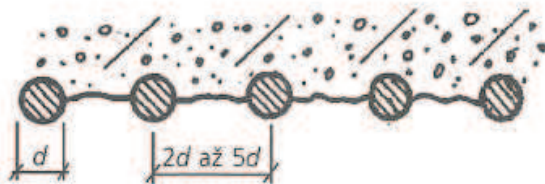
a) jednofázový systém, b) dvojfázový vzduchový, c) dvojfázový vodný, d) trojfázový systém

3.5. Mikropilótové steny

Predstavujú prechod medzi pilotov s malým priemerom a kotvením. Odlišujú sa však výrobou a statickým pôsobením. Výhodou je variabilita, schopnosť prispôbiť sa zmene v geologických podmienkach, priestorovým prekážkam a pod. Vo väčšine prípadov sú mikropilóty namáhané tlakom aj ťahom, ich únosnosť závisí na geologických podmienkach, druhu výstuže a dĺžke prvku. [4]

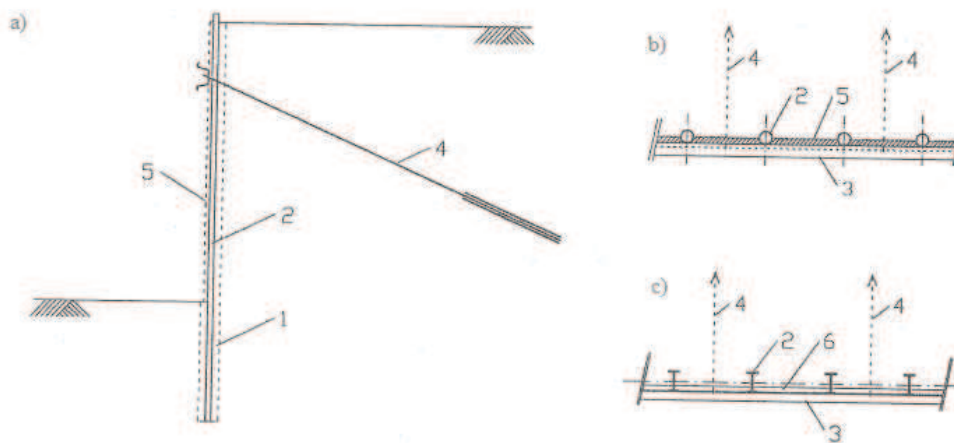
Mikropilótové steny sú vhodné k zaisteniu stavebných jám do hĺbky maximálne 9 m na ťažko prístupných miestach a pri hĺbení v skalných horninách. Osová vzdialenosť vrtov je 2 d až 5 d (Obr. 7), kde d predstavuje polomer mikropilóty (maximálne 150 mm). Do vrtu

sa buď osadzuje výstuž z betonárskej ocele v tomto prípade ide o vystužené pilóty, alebo oceľová rúra, ktorá najlepšie spĺňa požiadavku na ohybovú tuhosť.



Obrázok 7 Mikropilótové steny [6]

Neoddeliteľnou súčasťou mikropilótovej steny sú injektované kotvy (Obr. 8) vo viacerých úrovniach, ktoré slúžia na zachytenie horizontálnych účinkov tlaku hornín. V niektorých prípadoch na zvýšenie tuhosti a možnosť prehĺbenia výkopu sa zhotovuje stena ako dvojradová. Nevýhodou mikropilótovej steny je správne stanovenie zaťaženia pri statickom návrhu, oproti pilotovým stenám sú výrazne poddajnejšie. [6]



Obrázok 8 Schéma mikropilótovej steny [6]

a) charakteristický rez, b) pôdorys – trubkové mikrozápory, c) pôdorys – HEB mikrozápory

1 – vrt vyplnený cementovou zaliwkou, 2 – mikrozápora, 3 – prevážka, 4 – kotva, 5 – striekaný betón, 6 – pažiny

3.6. Podzemné steny

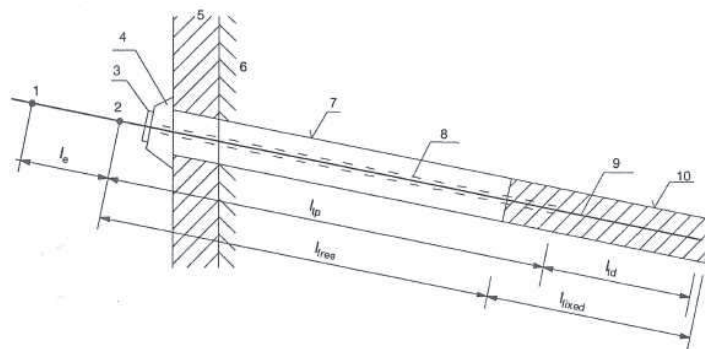
Zhotovujú sa ako pažiaci, tesniaci a konštrukčný prvok do hĺbky niekoľko metrov. Z konštrukčného hľadiska ide o monolitickú alebo prefabrikovanú železobetónovú konštrukciu, ktorá sa vkladá do vopred vyhlúbenej ryhy.

Výhodou je prenos vodorovných aj zvislých zaťažení do veľkých hĺbok. Navrhujú sa iba v prípadoch, kde budú trvalou súčasťou stavby, nakoľko ich technologické prevedenie a ekonomická náročnosť sú vysoké. [4]

3.7. Horninové kotvy

Ide o prvky, ktoré slúžia na prenos horizontálnych síl od odhaleného povrchu terénu do nepoškodenej časti horninového masívu. Pri zabezpečovaní priportálových úsekov tunelov sa najčastejšie používajú z množstva druhov predpäté injektované kotvy, ktoré poskytujú možnosť zabezpečenia členitých a priestranných úsekov s hĺbkou niekoľko desiatok metrov aj v stiesnených podmienkach.

Kotva (Obr. 9) prenáša ťahovú silu od pažiacej konštrukcie cez hlavu kotvy a tiahlo do koreňa, ktorý je umiestnený až za predpokladanú šmykovú plochu. Tiahlo kotvy predstavuje oceľová tyč, hrubostenná oceľová rúrka alebo oceľové lano, ktorého voľná dĺžka sa musí chrániť protikoróznou ochranou pred poškodením (napr. náterom, pastou, rúrkami z plastov) tak, aby sa kotva mohla predopnúť a súčasne sa nepoškodila táto ochrana. Koreň tiahla kotvy sa injektuje cementovým mliekom. [4], [5]



Obrázok 9 Schéma injektovanej horninovej kotvy [5]

1 – bod na ukotvenie tiahla v napínacom zariadení, 2 – bod na ukotvenie tiahla v hlave kotvy, 3 – podkladná doska, 4 – podbetónovanie, 5 – kotvená konštrukcia, 6 – hornina, 7 – vrt, 8 – povlaková trúbka, 9 – tiahlo, 10 – koreň kotvy

l_e = vonkajšia dĺžka kotveného tiahla, l_f = voľná dĺžka ocelového tiahla, l_{id} = kotevná dĺžka tiahla, l_{free} = voľná dĺžka kotvy, l_{fixed} = dĺžka koreňa kotvy

Smer kotiev je daný povrchom terénu, usporiadaním vrstiev podložia a statickými podmienkami.

Pri návrhu kotevného systému treba prejsť vnútornú aj vonkajšiu stabilitu. Posúdenie vnútornej stability zhodnocuje únosnosť tiahla, ukotvenie tiahla v koreni a únosnosť koreňa kotvy. Rovnako sa posudzuje aj rovnováha klinu horniny, ktorá je daná povrchom terénu, pažiacou konštrukciou a koreňom kotvy. Pri posúdení vonkajšej stability je rozhodujúcim aspektom predstavovaná šmyková plocha, ktorá prechádza päťou zabezpečovaného svahu alebo päťou pažiackej konštrukcie a vonkajším obrysom koreňa kotiev, prípadne oslabenou zónou za koreňom kotvy. [5]

3.8. Klincovanie hornín

Metóda je určená na zlepšenie vlastností hornín, predovšetkým šmykovej pevnosti, pomocou vystuženia a pokrytia povrchu svahu v jeho prirodzenom uložení. Spôsob zabezpečenia portálu klincovaním cieľavedome využíva prirodzené deformácie svahu k aktivácii výstužných prvkov – klincov, čo účinne zabraňuje vytváraniu trhlin najmä v oblasti pozdĺž povrchu svahu.

Predpoklad metódy je, že svahom nepresakuje väčšie množstvo podzemnej vody alebo sa dá presakované množstvo spoľahlivo zachytiť bežným spôsobom bez ohrozenia bezpečnosti a zhoršenia estetického vzhľadu celej steny. [4], [6]

Technológia realizácie (Obr. 10) spočíva v postupnom hĺbení etáží. V prvom štádiu sa vyhlíbi podľa typu horniny vrstva 1,2 až 2,0 m, do ktorej sa následne vyvrtávajú otvory pre klinec vo vzdialenostiach 1 až 2 m. Osadenie klinec do vrtov prebieha mokrým procesom to znamená, že vyvrtaný otvor sa vyplní cementovou zálievkou a následne sa inštaluje klinec, ktorý vyčnieva vhodnou dĺžkou. Ďalším krokom je prekrytie povrchu oceľovou sieťovinou, opatrenie vyčnievajúcich hláv klinec maticami a podložkami a následné naniesenie približne 100 mm vrstvy striekaného betónu. Celý technologický postup sa opakuje v ďalšej etáži.



Obrázok 10 Schéma pracovného postupu klincovaného svahu [6]

Klinec sa vkladajú do vrtu s cementovou zálievkou bez akejkoľvek úpravy povrchu, z tohto pohľadu sa jedná o dočasné konštrukcie. Pre trvalú úpravu je nutná protikorózna ochrana klinca. [4]

Prednosťou klincovaného svahu je prispôsobivosť konštrukcie tvaru zárezu, rovnako ako vykazovanie malých deformácií klincovaného svahu. [6]

4. Rešerše nestabilít portálov tunelov

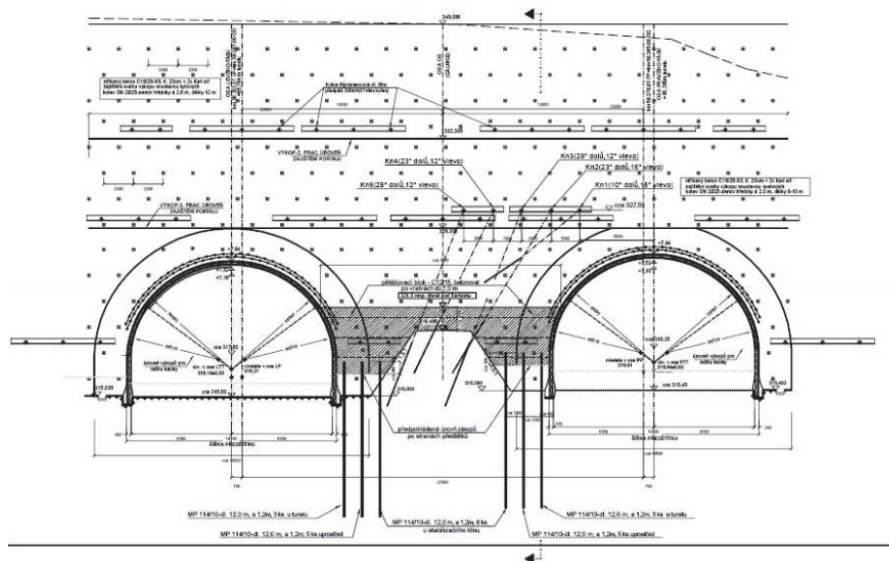
Portálové časti cestných a diaľničných tunelov patria spravidla k najnáročnejším častiam samotnej výstavby. Vyžadujú si zvýšenú pozornosť už v prípravných fázach projektu. V tejto kapitole budú priblížené niektoré poruchy portálov v čase výstavby, zmeny projektov na základe skutočného chovania hornín a rôzne iné. Práve tieto skutočnosti sú poukázané na konkrétnych príkladoch.

4.1. Tunel Prackovice – Pražský portál

Tunel Prackovice je súčasťou stavby D8 – 0805 Lovosice – Řehlovice. Dvojpruhový jednosmerný diaľničný tunel sa skladá z dvoch tunelových rúr o dĺžke 270 m a 260 m. Tunel je z časti razený a na koncoch hĺbený, v definitívnom stave je zasypaný. [9]

Hĺbená časť oboch tunelových rúr v oblasti pražského portálu je z hľadiska geologickej stavby a morfológie terénu vo veľmi komplikovaných a rôznorodých podmienkach. Svahy pri portály tunela sú z väčšej časti pokryté sutinou. Sutina ma kamenitý až balvanitý charakter, výplň je prevažne hlinito-piesočnatá a celkovo je kyprá. Navyše sa jedná o územie bývalého lomu na čadič, čo vytvára mimoriadne zložité podmienky pre zaistenie portálu a samotné razenie tunela. [7]

Základný návrh zaistenia portálu (Obr. 11) je gravitačná stena, ktorá je tvorená sústavou tyčových kotiev SN, zemné klinec v kombinácii s plošnou škrupinou so striekaného betónu, ktorá okrem prepojenia klincov vyplnila i systém puklín v okolí. Gravitačnú stenu dopĺňajú oceľové siete na svahu portálovej steny. Klinec sú kotvené pod škrupinu striekaného betónu tak, aby sa povrchové napätia vzniknuté postupným odťažovaním častí svahu prenášali do hlbších partií masívu. Navyše sú na portálovej stene umiestnené v troch úrovňach pramencové kotvy, ktoré zaisťujú celkovú stabilitu bloku z hľadiska možného zosuvu. Kotvy situované nad obrysom budúceho tunela boli smerovo odklonené aby nezasahovali do profilu tunela. [7], [8]



Obrázok 11 Pohľad na zaistenie pražského portálu [8]

Interakciu ťahových prvkov – klinec s vystuženým prostredím horninového masívu nebolo možné spoľahlivo zaistiť. Preto bola dodatočne navrhnutá predstihová sanácia horninové prostredia. Sanácia bola realizovaná formou spevnenia prostredia tryskovou injektážou po celej aktívnej dĺžke jednotlivých klinec. Až do takto sanovaného prostredia boli realizované vrty, osadzované klinec aktivované cementovou zálievkou a ostatné prvky gravitačnej steny. [7]

Behom realizácie všetkých opatrení na zaistenie portálu prebiehali geodetické merania deformácií na svahu portálov, to znamená merania absolútnych zmien priestorovej polohy bodov osadených na stenách portálu, ktoré slúžili na overenie ich stability a geotechnický monitoring, ktorý sledoval vývoj deformácií portálovej steny.

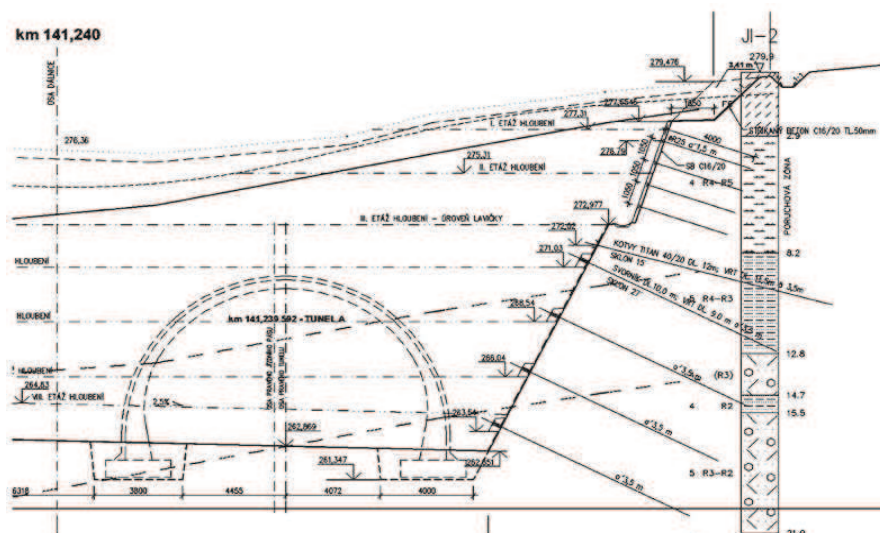
Rovnako bola sledovaná odozva v hlbších partiách masívu inklinometrickým a extenzometrickým sledovaním. Vyhodnotenie výsledkov ukázalo pomerne veľkú reakciu na postupujúce práce, hlavne na vývoj deformácií v oblasti portálovej steny. K zaisteniu ustálenia deformácií bolo navrhnuté zosilnenie stability päty svahu portálu medzi tunelmi pribetónovaním stabilizačného bloku na oporný horninový klin založený na šikmých mikropilótach. Zhotovenie monolitického stabilizačného bloku po vyhodnotení výrazne prispelo k ustáleniu deformácií. [9]

4.2. Tunel Klimkovice – oblasť portálu stavebnej jamy Brno

Tunel je vedený v dvoch samostatných dvojpruhových tunelových rúrach. V priortálových úsekoch boli tunely budované ako hĺbené v otvorených stavebných jamách s následným prisýpaním. V ostatnej dĺžke razené v skalnom masíve. Je súčasťou výstavby diaľnice D47 Lipník nad Bečvou – Bohumín.

Prieskumné práce v oboch stavebných jamách ukázali veľmi zložité geologické pomery. Boli zaznamenané náznaky veľkého hĺbkového zvetrávania hornín, rozsiahlych poruchových pásiem, nebezpečenstvo nestability a zosuvných miest.

Deliacim prvkom medzi razenou a hĺbenou časťou boli provizórne portály, na ktoré priamo nadväzovali svahy stavebnej jamy. Svahy stavebnej jamy (Obr. 12) a provizórne portály boli dočasne stabilizované železobetónovými roznášajúcimi prahmi, lanovými a tyčovými kotvami, klinecami a striekaným betónom vystuženým oceľovou KARI sieťou. V portálových stenách boli po obvodu zarážky budúcich tunelov budované ochranné mikropilótové dáždniky a ochranné železobetónové límce. [15]



Obrázok 12 Zabezpečenie svahu [16]

Počas hĺbenia stavebnej jamy Brno bol zaznamenaný nárast vodorovných deformácií pravého svahu v troch meraných profiloch spojený s daždivým obdobím. V oblasti sa

prejavili geologické poruchy, ktoré skomplikovali zaistenie svahu jamy už od prvých etáží výkopu. Rozsah poruchovej zóny s aktívnym pohybom do dna stavebnej jamy bol zistený inklinometrickým vrtom. Podľa statického posúdenia bolo navrhnuté dodatočné zaistenie nestabilnej časti svahu pomocou ďalšej etáže tyčových kotiev zo samozavírajúcich tyčí do prevážok oceľových profilov štetovnicovej steny. Následné odťaženie povrchových kvartérnych vrstiev zaistilo stabilitu pravého svahu. [16]

4.3. Tunel Višňové – západný portál

Nachádza sa na území Slovenska na úseku diaľnice D1 Lietavská Lúčka – Dubná skala. Realizuje sa dvoma samostatnými tunelovými rúrami pre jeden smer jazdy. Trasa úseku a vyústenie portálov bolo realizované v predprojektovej príprave v rámci technickej štúdie už v roku 1996. Po zhotovení inžinierskogeologického prieskumu, v ktorom bol zistený výskyt zosuvného a nestabilného územia sa muselo technické riešenie pozmeniť.

Pôvodný návrh západného portálu (Obr. 13) prechádzal cez ochranné pásmo vodného zdroja Višňové – Studničky. Vzhľadom na výskyt zosuvného a nestabilného územia bol portál presunutý južnejšie o cca 300 m od prvého návrhu. Posunom boli rovnako eliminované aj predpokladané negatívne účinky na existujúce vodné zdroje. [14], [17]



Obrázok 13 Pohľad portál tunela Višňové [17]

4.4. Tunel Žilina – západný portál

Tunel Žilina je zložený z dvoch tunelových rúr, v ktorých sa uvažuje s jednosmernou premávkou. Nachádza sa na území Slovenska a je v úseku diaľnice D1 Hričovské Podhradie – Lietavská Lúčka. Inžinierskogeologický prieskum pred výstavbou tunela ukázal veľmi zložité geologické pomery. Územie pred portálmi a rovnako aj v trase tunela má charakter poľnohospodárskej pôdy, lesov a lúk. V koridore tunela je vyvinutých množstvo geodynamických procesov ako sú svahové pohyby, zvetrávanie, erózia a objemové zmeny. Všetky predpokladané zložité geologické podmienky sa ukázali už pri realizácii samotného portálu. Boli viditeľné trhliny v teréne spôsobené zosuvným pásmom a intenzívne výtoky vody.

V okolí západného portálu (Obr. 14) je vyvinuté zastúpenie zosuvného delúvia, ktoré však nezasahuje bezprostredne do portálovej časti tunela, napriek tomu je celá oblasť poznačená blízkosťou potenciálneho prúdového zosuvu, ktorý je stabilizovaný ale intenzívne podmäčaný. Skutočnosti nachádzajúce sa v okolí portálu si vyžadovali bezprostrednú sanáciu. Zvolená forma systému subhorizontálnych odvodňovacích vrtov s nevyhnutnou výmenou a definitívnou úpravou podložia. V zóne zvetrávania je ílovec zmenený na íl vysokej plasticity s tuhhou až pevnou konzistenciou.



Obrázok 14 Pohľad na portál tunela Žilina [13]

Portálová časť bola v prvom kroku zabezpečená stenou z vŕtaných veľkopriemerových pilót dĺžky 10 až 16 m a vo vrchnej časti zmonolitnených spriahajúcim vencom. Po odkopaní prvých 2 m terénu sa opäť ukázali náročné geologické podmienky, čo malo za následok pohyby pilotových stien a následná dilatácia spriahajúcich vencov. Realizácia postupného znižovania terénu a kotvenia pilotových stien bola pomocou lanových kotiev a kotevných prahov v ďalších krokoch. Západný portál bol zrealizovaný až na úroveň razenia pomocou spevnenej roviny z vrstvy hutnenej štrkodrti a betónovej plochy vystuženej kari sieťou. Portál bol realizovaný za neustáleho merania a pozorovania stien aj okolitého terénu. [12], [13]

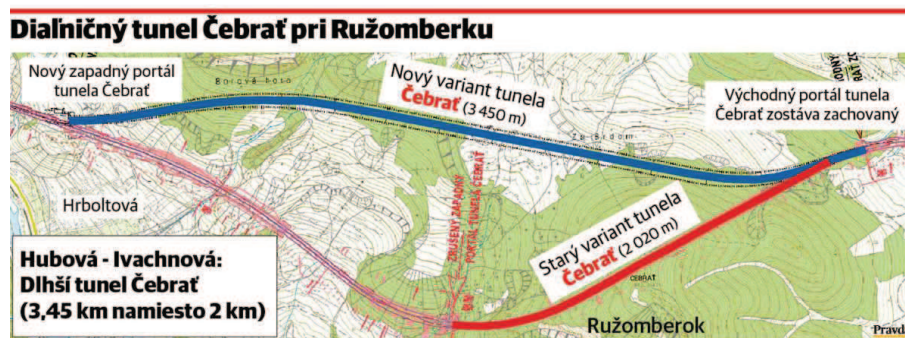
4.5. Tunel Čebrať – západný portál

Tunel Čebrať je súčasťou úseku D1 Hubová – Ivachnová na území Slovenska. Výstavba tunela bola pozastavená už po prvých piatich mesiacoch pre lokalizovaný prúdový zosuv v okolí západného portálu, ktorý sa šmýka do údolia Váhu.

Pôvodný predpoklad šmykových plôch zosuvu bol v hĺbke 10 až 14 m pod úrovňou terénu, čo by nemalo žiaden dopad na konštrukcie diaľnice, nakoľko sú ukotvené v oveľa väčšej hĺbke. V doplnkovom prieskume po rozbehnutí výstavby sa zistilo, že v oblasti rozsiahleho zosuvu sa šmykové plochy nachádzajú v úrovni 40 až 50 m pod povrchom terénu.

Po zhodnotení vzniknutej situácie boli dve možnosti riešenia. Jednou možnosťou bolo predĺženie tunela z pôvodných 2026 m na 3450 m, čím by sa diaľnica vyhla zosuvným oblastiam. Druhou možnosťou bolo zložené technické zabezpečenie všetkých konštrukcií vybudovaných na tomto území, aby sa neposúvali spolu so zosuvom.

Po roku od zastavenia prác na tunely bola oficiálne potvrdená prvá možnosť, ktorá súvisí s predĺžením tunela (Obr. 15) o viac ako 1km a posunom trasy severne o 700 m. [11]



Obrázok 15 Zmena trasy tunela [11]

4.6. Tunel Bancarevo – západný portál

Tunel je súčasťou vetvy Niš – hraničný prechod Dimitrovgrad. Pozostáva z dvoch jednosmerných samostatných tunelových rúr, ktoré sú razené podľa zásad NRTM. Portálové úseky oboch tunelových rúr sú zhotovované hĺbením.

Hĺbená časť západného portálu (Obr. 16) je podľa návrhu do hĺbky 20 m. Istenie čela portálu pomocou kotiev dlhých 5 m, sieť Q139 (prúty ϕ 4,2 mm, rozteč 100 x 100 mm) a 10 cm vrstva striekaného betónu.



Obrázok 16 Západný portál tunela [10]

V priebehu hĺbenia portálov boli odhalené výrazné odlišnosti od skutočnej geológie a geológie, ktorá bola predpokladaná projektom. V hlbších úsekoch, kde predpokladal projekt skalné horniny, bol reálne zastihnutý materiál na rozhraní zeminy a poloskalnej horniny. Kvôli tejto skutočnosti bola potreba zmeniť pôvodný projekt zaistenia svahu. Nový projekt nariadil spätný zásyp už vyhlúbenej jamy, použitie 32 km SN kotiev s dĺžkou 5 až 10 m, 70 ton oceľových sietí a 1800 m³ striekaného betónu MMB30. Tento rozsah prác navýšil objem výkopu na 70000 m³, vytvorenie jamy o hĺbke 40 m a oneskorenie výstavby o 9 mesiacov. [10]

5. Kombinovaná výstavba podzemných diel

Charakteristika kombinovaných metód výstavby spočíva v spojení prvkov razenia a hĺbenia. Realizácia podzemného diela pozostáva prvotne vo vyhlíbení otvoreného výkopu, ktorý slúži na osadenie stropnej konštrukcie, pod ktorou následne prebieha už samotné razenie tunela. [4]

5.1. Rozdelenie metód výstavby podzemných diel

Technológia výstavby podzemných diel rozoznáva štyri základné skupiny, z ktorých je nutné vybrať najvhodnejšiu pre dané podmienky. Sú to razené, hĺbené, špeciálne budované a kombinované podzemné stavby. Pri voľbe najpraznivejšej metódy výstavby zohrávajú hlavnú úlohu požadovaný tvar a veľkosť prierezu, geologické, hydrologické a topografické podmienky, hĺbka uloženia diela pod povrchom. Menej dôležitým parametrom sú požiadavky na rýchlosť a hospodárnosť stavby a na ekologické dôsledky. Cieľ, ktorému bude dielo v budúcnosti slúžiť nezohráva pri výbere technológie výstavby veľkú podmienku. [2], [3], [4]

Výstavba razených podzemných diel prebieha celá pod povrchom bez rozrušenia nadložia. Rozoznávame rôzne metódy razenia ako sú konvenčné cyklické razenie s použitím trhavín, kontinuálne razenie s použitím plnoprofilových raziacich strojov – TBM, kontinuálne razenie s použitím mechanizovaných a nemechanizovaných tunelovacích štítov, pretlačovanie potrubí. Vhodná metóda sa volí na základe geologických podmienok, lokality a hospodárnosti výstavby.

Hĺbené podzemné diela sú charakterizované výstavbou, ktorá prebieha z povrchu terénu s postupným rozrušovaním nadložia. Po dokončení podzemného diela sa vyhlíbená časť terénu zasype a obnoví sa nadložie. K technológiám patrí výstavba v svahovaných jamách, v pažených výkopoch alebo výstavba s použitím podzemných stien. [4]

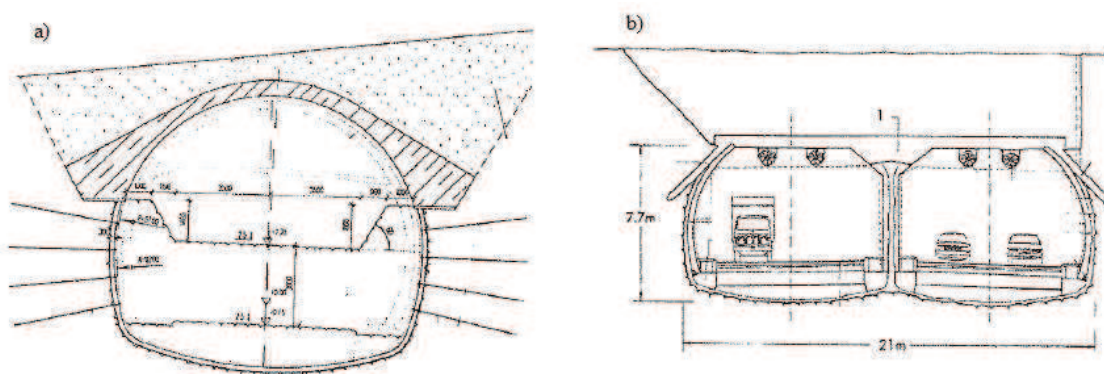
Špeciálne metódy výstavby nachádzajú uplatnenie predovšetkým v sektoroch, kde poskytujú oproti bežným metódam určité výhody. Patrí sem metóda naplavovania, spúšťanie studní alebo kesónov, erektorové razenie. [2], [4]

Spojením razenia a hĺbenia vznikajú kombinované metódy výstavby podzemných diel. Technológia zhotovenia spočíva vo vyhlĺbení otvoreného výkopu, v ktorom sa zhotoví stropná konštrukcia a samotný výrub tunela sa realizuje razením pod jej ochranou. Patrí sem vrchnáková metóda výstavby. [4]

5.2. Vrchnáková metóda výstavby

Ide o metódu kombinujúcu prvky hĺbenia a razenia. Princípom je otvorenie výkopu po úroveň päty konštrukcie zastropenia, zhotovenie konštrukcie, zásyp a následné razenie už pod ochranou vybudovanej konštrukcie. [3]

Zabezpečenie stien stavebnej jamy môže byť zaistené rozličnými spôsobmi. Na upravenom dne výkopu alebo do debnenia sa zhotoví vrchnák – konštrukcia primárneho ostenia, ktorá môže mať tvar klenby („korytnačky“) (Obr. 17a)) alebo plochej stropnej dosky (Obr. 17b)). Po zhotovení vrchnáka sa výkop zasype a ďalšia výstavba už prebieha pod ochranou takto zabezpečeného stropu.



Obrázok 17 Príklady využitia vrchnákovej metódy výstavby [4]

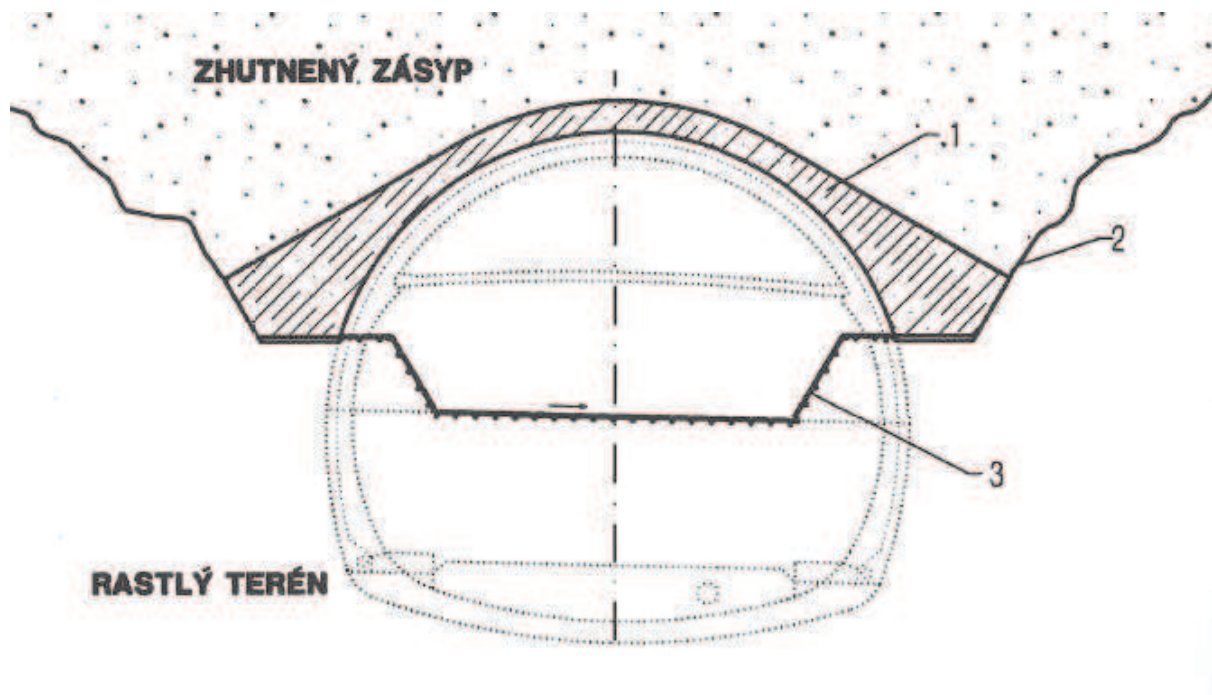
a) tunel Branisko b) tunel v SRN

K jej aplikácií prichádza v územiach, kde je z rozličných dôvodov potreba zmenšenia hĺbky výkopu alebo v čo najkratšom čase nutnosť uvedenia povrchu do pôvodného stavu. Napríklad pri výstavbe tunelov v trasách mestských komunikácií, kde je treba čo najskôr obnoviť dopravu na povrchu alebo pri predportálových zárezoch razených tunelov, kde hrozí nebezpečenstvo zosuvov a sú nutné rozsiahle nákladné opatrenia na zabezpečenie.

Použitie tejto metódy prináša výhodu v zmenšení hĺbky stavebnej jamy o 5 – 10 m, čím sa značne skráti doba otvorenia výkopu a rozsah zemných prác. V súvislosti so skrátením doby otvorenia výkopu sa rovnako zmenší aj nebezpečenstvo svahových pohybov. [3], [4]

5.3. Metóda „korytnačka“

Postup výstavby (Obr. 18) spočíva prvotne v otvorení výkopu na úroveň spodného líca budúcej konštrukcie korytnačky. Na upravené dno výkopu alebo do debnenia sa realizuje klenbová konštrukcia. [4]



Obrázok 18 Metóda korytnačka [3]

1 - klenbová konštrukcia 2 - odkop pre konštrukciu vrchnáka 3 - odkop pod vrchnákom

V prípade monolitickkej klenby sa separuje podložie od betónu tenkou PE fóliou, ktorá pri razení uľahčuje oddelenie rúbanina od konštrukcie zastropenia a zároveň vytvára hladkú plochu pre inštaláciu medziľahlej izolácie.

Pokiaľ ide o prefabrikovanú konštrukciu, tá sa osadzuje na základové pásy, ktoré sú zaistené proti deformáciám kotvením alebo mikropilótami. Pri použití prefabrikovanej klenby sa skráti výstavba stropnej konštrukcie a doba otvorenia výkopu. [2]

V kvalitnom teréne, kde s hĺbkou výkopu narastá aj pevnosť skalného prostredia nie je nutné podchytenie päty konštrukcie, nakoľko je využité práve toto prostredie ako podpera pre založenie konštrukcie korytnačky. V horších podmienkach sa päta podchycuje kvôli deformácii stĺpmi z tryskovej injektáže, kotvami alebo mikropilótami. Pokiaľ sa jedná o prostredie s veľmi nepriaznivými geotechnickými podmienkami je nutné zaistiť boky podzemnou alebo pilotovou stenou. Klenba korytnačky v takomto prípade tvorí rozperu zvislým prvkom zaistenia stavebnej jamy a je votknutá do pažiacej konštrukcie. [21]

Následne sa zasype výkop a paralelne s úpravou povrchu výkopu môžu prebiehať práce, ktoré súvisia s čelným odťažovaním tunela už pod ochranou stropnej korytnačky. [4]

Klenbový tvar korytnačky je veľmi výhodný najmä zo statického hľadiska. Pričom klenba vytvára statický trojkľbový oblúk necitlivý na deformáciu podpor. [2]

6. Návrh zabezpečenia stavebnej jamy v oblasti portálu

Predmetom praktickej časti bakalárskej práce je porovnanie dvoch spôsobov zabezpečenia stavebnej jamy v oblasti portálu tunela. V prvom návrhu bolo využité zabezpečenie pomocou svahovania, striekaného betónu prípadne gabiónových matracov, horninových klincov a lanových kotiev. Stavebná jama bola v tomto spôsobe vyhlbená až na dno tunelu. V druhom prípade bolo uvažované zabezpečenie pomocou svahovania, striekaného betónu prípadne gabiónových matracov, horninových klincov, lanových kotiev a rovnako aj konštrukciou klenby. Vyhlbenie stavebnej jamy v tomto prípade bolo po úroveň konštrukcie klenby.

6.1. Metodika posúdenia

Metodika posúdenia bezpečnosti v programe GEO5 bola zvolená ako výpočet podľa „Stupňa bezpečnosti“. Pri zvolenej metóde výpočtu neboli ani zaťaženie, ani parametre zeminy a ostatných použitých materiálov redukované pomocou žiadnych výpočtových koeficientov. Hodnota stupňa bezpečnosti bola uvažovaná 1,5. [18]

Celé posúdenie stability bolo dané vzťahom:

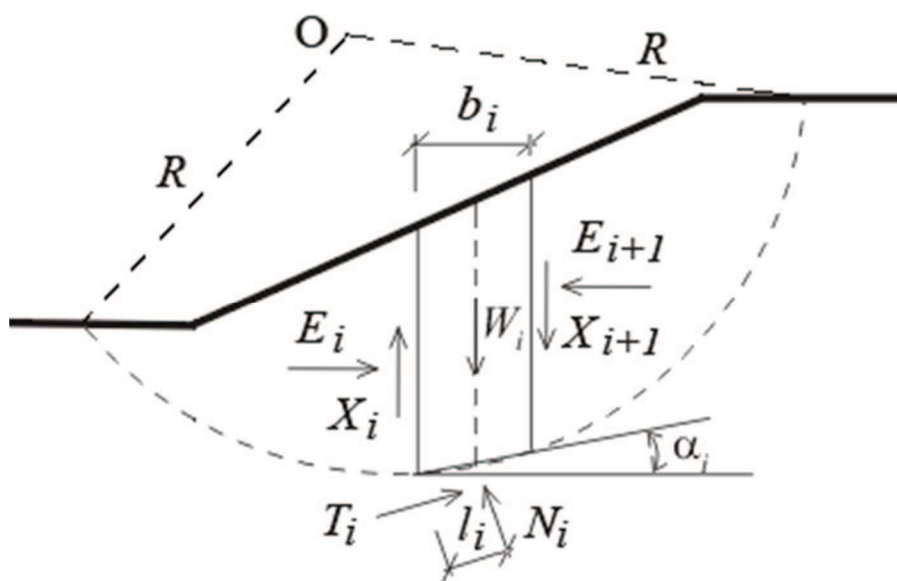
$$\frac{M_P}{M_A} > SF_S \quad [18]$$

kde:	M_P	vzdorujúci moment	[kNm/m]
	M_A	zosúvajúci moment	[kNm/m]
	SF_S	stupeň bezpečnosti	[-]

6.2. Spôsob modelovania šmykovej plochy

Pre modelovanie a výpočet šmykovej plochy bola zvolená kruhová šmyková plocha a jej optimalizácia. Optimalizácia šmykovej plochy zaistila jej najkritickejšiu polohu, teda bola určená najmenšia hodnota stupňa stability SF. Šmyková plocha a stupeň stability bol určený vždy pre pravý aj ľavý svah výkopu. V závere bol v jednej etáži výkopu vybraný štandardný postup výpočtu oboch spôsobov zabezpečenia, aby bolo možné porovnanie stupňa stability na rovnakých parametroch šmykovej plochy.

Zvolená bola metóda výpočtu šmykovej plochy podľa Bishopa (Obr. 19). Ide o zjednodušenú prúžkovú metódu, ktorá predpokladá nulové šmykové sily medzi blokmi X_i . Metóda je založená na splnení momentovej podmienky a zvislej silovej podmienky rovnováhy. [18]



Obrázok 19 Statická schéma - Bishopova metóda [18]

X_i – šmyková sila medzi blokmi, E_i – normálová sila medzi blokmi, T_i – šmyková sila na úseku šmykovej plochy, N_i – normálová sila na úseku šmykovej plochy, W_i – tiaž jednotlivých blokov, l_i – dĺžka oblúku, b_i – šírka bloku, α_i – sklon úseku šmykovej plochy, O – stred šmykovej plochy, R – polomer šmykovej plochy

Stupeň stability bol vypočítaný postupným opakovaním aplikácie vzťahu:

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \sin \alpha_i} * \sum_i \frac{c_i * b_i + (W_i - u_i * b_i) * \tan \alpha_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i * \sin \alpha_i}{FS}} \quad [18]$$

kde:	u_i	pórový tlak na bloku	[kPa]
	c_i, φ_i	efektívne hodnoty parametrov zeminy	[kNm/m]
	W_i	tiaž prúžku	[kN/m ³]
	α_i	sklon úseku šmykovej plochy	[°]
	b_i	šírka bloku	[m]

6.3. Charakteristika prostredia a materiálov

Návrhové prostredie, v ktorom bola predpokladaná realizácia tunela, bolo definované ako jednovrstvové bez prítomnosti podzemnej vody. Jednotlivé charakteristiky prostredia a ďalších použitých materiálov sú uvedené v tabuľkách č. 1 a 2.

CHARAKTERISTIKA	NÁZOV
	trieda F2 - íl štrkovitý
γ [kN/m ³]	19,50
v [-]	0,35
E_{def} [MPa]	11,00
φ [°]	27,00
c [kPa]	10,00

Tabuľka 1 Charakteristiky návrhového prostredia

CHARAKTERISTIKA	NÁZOV		
	gabiónový matrac	striekaný betón	betón
γ [kN/m ³]	26,00	25,00	23,00

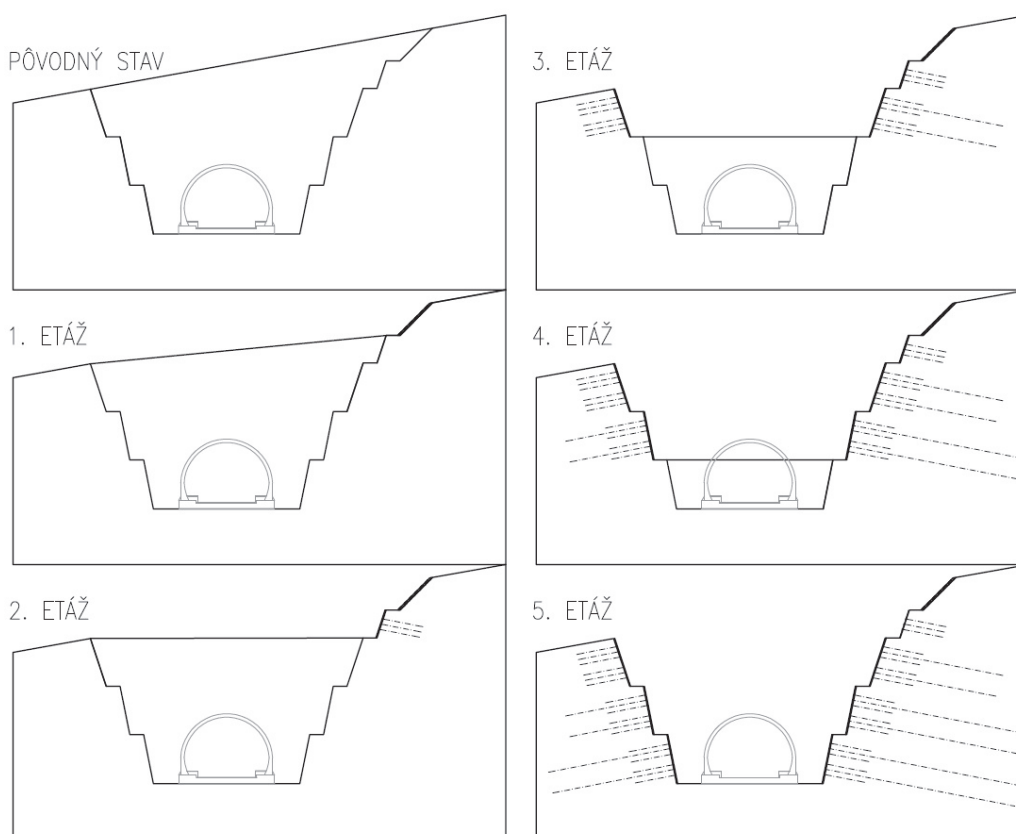
Tabuľka 2 Charakteristiky ostatných materiálov

6.4. Prvý spôsob zabezpečenia

6.4.1. Postup výpočtu

Geometria stavebnej jamy bola najskôr zobrazená v programe AutoCAD a následne importovaná do rozhrania programu GEO5.

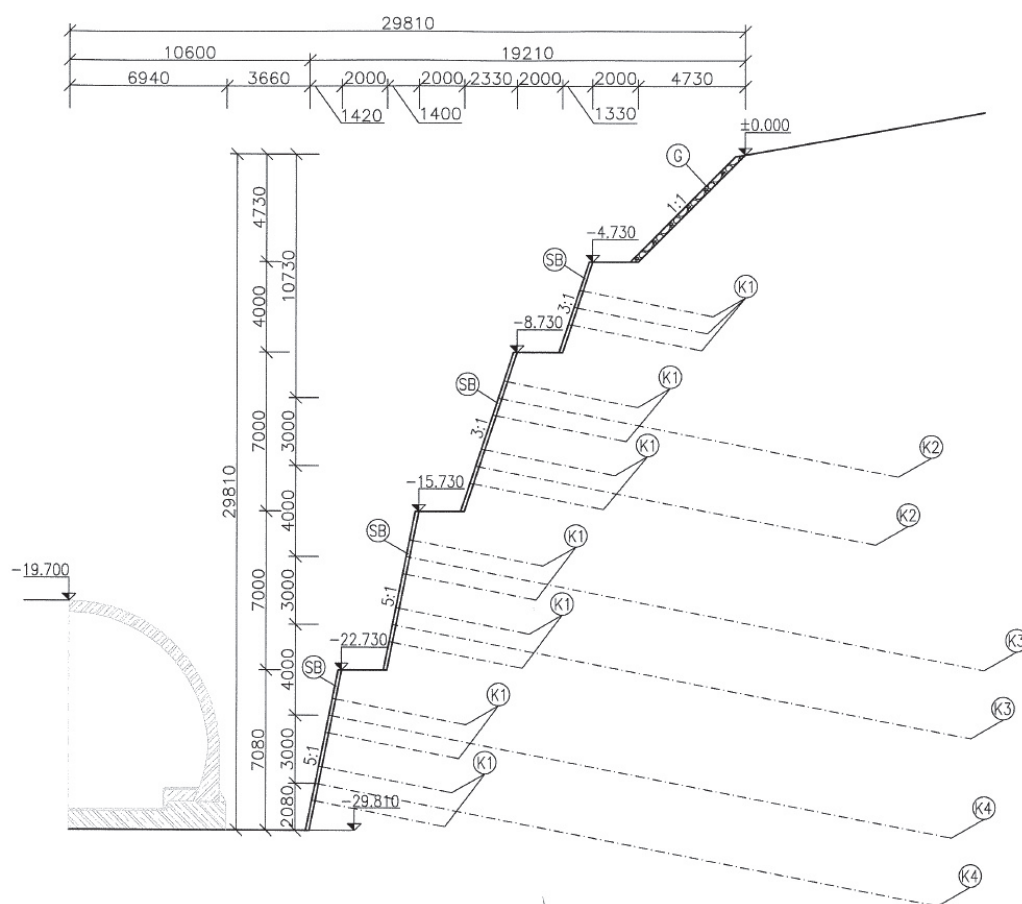
Stavebná jama bola realizovaná postupným hĺbením a zaistovaním portálovej steny v 5 etážach (Obr. 20). Postup zárezov jednotlivých etáží výkopu a následných násypov v podobe zabezpečenia svahu bol realizovaný v rozdielnych fázach výpočtu.



Obrázok 20 Postup výkopu a zabezpečenia pre 1. spôsob

6.4.2. Pravý svah

Portálová stena (Obr. 21) bola navrhnutá v rôznych sklonoch, postupne zaistená striekaným betónom po prípade gabiónovými matracmi, horninovými klincami a lanovými kotvami.



Obrázok 21 Geometria pravého svahu

Vrchná časť bola navrhnutá ako svah so sklonom 1:1 a výškou 4,73 m. Zabezpečený bol gabiónovým matracom hrúbky 250 mm, ktorý bol istený pomocou krátkych kotiev.

Pod vrchnou časťou sa mení sklon svahu na sklon 3:1 s výškou 4,0 m. Svah bol v prvej etape zabezpečený striekaným betónom hrúbky 150 mm. Následne pomocou horninových klincov dĺžky 6,0 m so sklonom 11° od horizontály. Klince boli navrhnuté v troch radoch a v pozdĺžnom smere vo vzdialenosti 1,0 m.

Ďalšia časť výkopu bola realizovaná tiež v sklone 3:1 a vo výške približne 7,0 m. Zabezpečenie stability steny prostredníctvom striekaného betónu hrúbky 150 mm. V druhom kroku boli umiestnené horninové kline v štyroch radoch, vzdialené v pozdĺžnom smere 1,0 m, s dĺžkou 6,0 m a odklonom 11° od horizontály. Potom boli v dvoch radoch osadené lanové kotvy dĺžky 18,0 m s priečnou osovou vzdialenosťou 3,0 m, v pozdĺžnom smere vzdialené 1,0 m a odklonom rovnako ako kline 11° od horizontály.

Pod touto časťou bol zhotovený svah so sklonom 5:1 a výškou 7,0 m. Zaistenie stability bolo najskôr pomocou striekaného betónu hrúbky 150 mm. Následne boli vŕtané horninové kline v štyroch radoch, vzdialené v pozdĺžnom smere 1,0 m, s dĺžkou 6,0 m a odklonom 11° od horizontály. Lanové kotvy s dĺžkou 26,0 m boli osadené rovnako ako v predošlej etáži, čiže s priečnou osovou vzdialenosťou 3,0 m, v pozdĺžnom smere vzdialené 1,0 m a sklonom 11° od horizontály.

Posledný svah je navrhnutý so sklonom 5:1 a o výške 7,08 m. Svah bol v prvej forme zabezpečený striekaným betónom s hrúbkou 150 mm. Nasledovalo osadenie horninových klinecov v štyroch radoch. Boli vzdialené v pozdĺžnom smere 1,0 m, s dĺžkou 6,0 m a odklonom 11° od horizontály. Ďalej boli zhotovené lanové kotvy s dĺžkou 28,0 m osadené s priečnou osovou vzdialenosťou 3,0 m, v pozdĺžnom smere vzdialené 1,0 m a sklonom 11° od horizontály.

Špecifikácia jednotlivých prvkov je uvedená v tabuľke číslo 3 a 4. Jednotlivé časti steny boli rozdelené lavicami o šírke 2,0 m.

OZNAČENIE	POPIS	HRÚBKA [mm]
SB	striekaný betón, $\gamma=25,00\text{kN/m}^3$	150,00
G	gabiónový matrac, $\gamma=26,00\text{kN/m}^3$	250,00

Tabuľka 3 Legenda tuhých prvkov

OZNAČENIE	POPIS	SILA V KOTVE [kN]	DĹŽKA [m]
K1	horninový klinec CKT ϕ 25,0 mm	390,00	6,00
K2	lanová kotva MCA-P 4 pramence ϕ 15,3 mm	620,00	18,00
K3	lanová kotva MCA-P 5 pramencov ϕ 15,3 mm	780,00	26,00
K4	lanová kotva MCA-P 7 pramencov ϕ 15,3 mm	1090,00	28,00

Tabuľka 4 Legenda horninových klincov a lanových kotiev [19], [20]

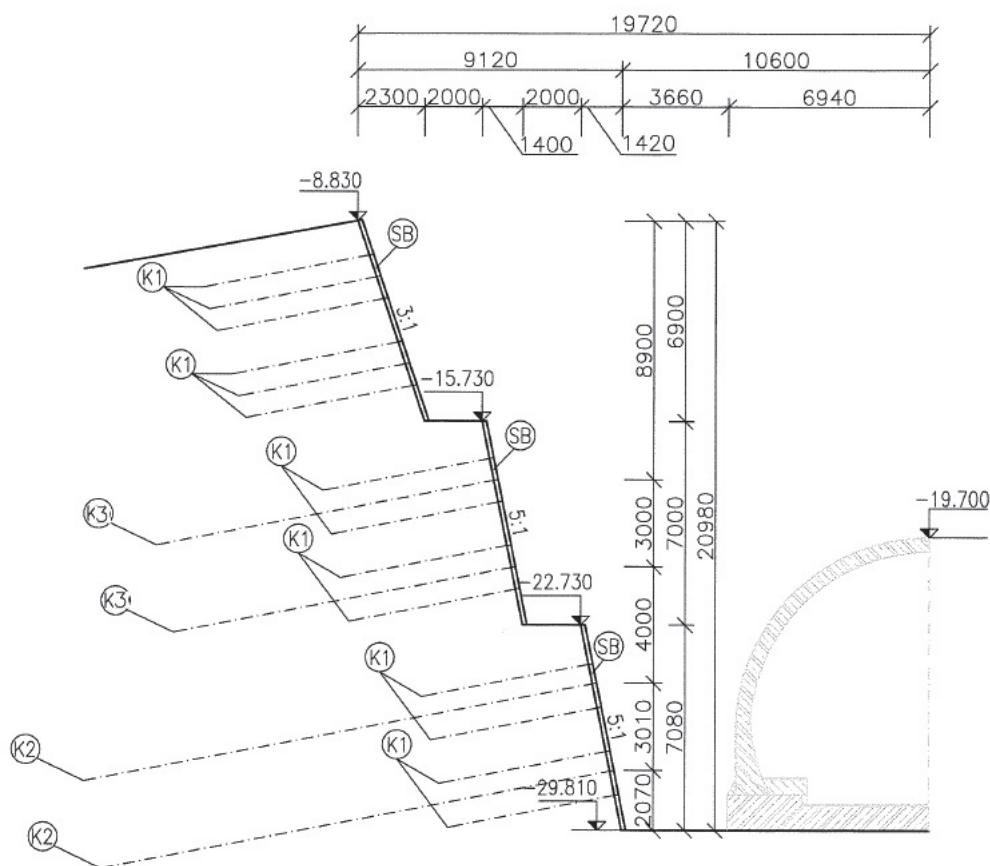
Pre každú etáž výkopu bola v programe GEO5 určená pomocou optimalizácie najkritickejšia šmyková plocha. Stupeň stability bol vždy spočítaný najprv pre svahovaný nezabezpečený výkop, pričom bez zabezpečenia vyhovoval výkop iba v prvej etáži, kedy bol svah v sklone 1:1 a na mierne zvýšenie stability bol použitý gabiónový matrac. Primárne bol výkop v druhej až piatej etáži zabezpečený vždy striekaným betónom. Touto formou zabezpečenia však nebol dosiahnutý potrebný stupeň stability ani v jednej z hĺbených etáží. Z tohto dôvodu bol dodatočne výkop zabezpečený pomocou horninových klincov a lanových kotiev. Konečné stupne stability po zaistení jednotlivých etáží pravého svahu sú uvedené v tabuľke číslo 5.

	POSTUP VÝKOPU				
	1. etáž	2. etáž	3. etáž	4. etáž	5. etáž
STUPEŇ STABILITY	1,59	1,52	1,69	1,55	1,53
POSUDOK	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

Tabuľka 5 Stupeň stability

6.4.3. Ľavý svah

Stena bola realizovaná v troch svahoch s rôznymi sklonmi (Obr. 22). Pri hĺbení bola postupne zaistená striekaným betónom, horninovými klincami a lanovými kotvami.



Obrázok 22 Geometria ľavého svahu

Prvá časť so sklonom 3:1 s výškou 6,9 m bola v prvej etape zabezpečená striekaným betónom hrúbky 150 mm. Následne pomocou horninových klincov dĺžky 6,0 m so sklonom 11° od horizontály. Klince boli navrhnuté v šiestich radoch v pozdĺžnom smere so vzdialenosťou 1,0 m.

Pod vrchnou časťou bol realizovaný svah v sklone 5:1 a s výške približne 7,0 m. Zabezpečenie stability steny prostredníctvom striekaného betónu hrúbky 150 mm. V druhom kroku boli umiestené horninové klince v šiestich radoch, vzdialené v pozdĺžnom smere 1,0 m, s dĺžkou 6,0 m v prvom, treťom, štvrtom a šiestom rade a s dĺžkou 12,0 m v druhom a piatom rade. Sklon klincov bol navrhnutý 11° od horizontály.

Posledný svah bol so sklonom 5:1 a výškou 7,08 m. Zaistenie stability bolo najskôr pomocou striekaného betónu hrúbky 150 mm. Následne boli umiestené horninové klince v štyroch radoch, vzdialené v pozdĺžnom smere 1,0 m, s dĺžkou 6,0 m a odklonom 11° od

horizontály. Potom boli v dvoch radoch osadené lanové kotvy dĺžky 18,0 m, s priečnou osovou vzdialenosťou 3,01 m, v pozdĺžnom smere vzdialené 1,0 m a odklonom rovnako ako klinec 11° od horizontály.

Špecifikácia horninových klinec a lanových kotiev je uvedená v tabuľke číslo 6 a legenda tuhých prvkov vid'. tabuľka číslo 3. Jednotlivé časti steny boli rozdelené lavicami o šírke 2,0 m.

OZNAČENIE	POPIS	SILA V KOTVE [kN]	DĹŽKA [m]
K1	horninový klinec CKT ϕ 25,0 mm	390,00	6,00
K2	lanová kotva MCA-P 4 pramence ϕ 15,3 mm	620,00	18,00
K3	horninový klinec CKT ϕ 25,0 mm	390,00	12,00

Tabuľka 6 Legenda horninových klinec a lanových kotiev [19], [20]

Rovnako aj pri tomto svahu bola pre každú etáž v programe GEO5 určená pomocou optimalizácie najkritickejšia šmyková plocha. Pretože hĺbenie ľavého svahu bolo začaté až v spojitosti s treťou etážou výkopu, bol aj stupeň stability počítaný až od tejto fázy. Stupeň stability bol vždy spočítaný najprv pre nezabezpečený výkop, pričom v žiadnej etáži nebol dosiahnutý požadovaný stupeň stability iba svahovaním. V prvej fáze bol výkop v tretej až piatej etáži zabezpečený vždy striekaným betónom. Touto formou zabezpečenia však nebol dosiahnutý potrebný stupeň stability ani v jednej z hĺbených etáží. Z tohto dôvodu bol dodatočne výkop zabezpečený pomocou horninových klinec a lanových kotiev. Konečné stupne stability po zaistení jednotlivých etáží ľavého svahu sú uvedené v tabuľke číslo 7.

	POSTUP VÝKOPU				
	1. etáž	2. etáž	3. etáž	4. etáž	5. etáž
STUPEŇ STABILITY	-	-	2,25	1,79	1,98
POSUDOK	-	-	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

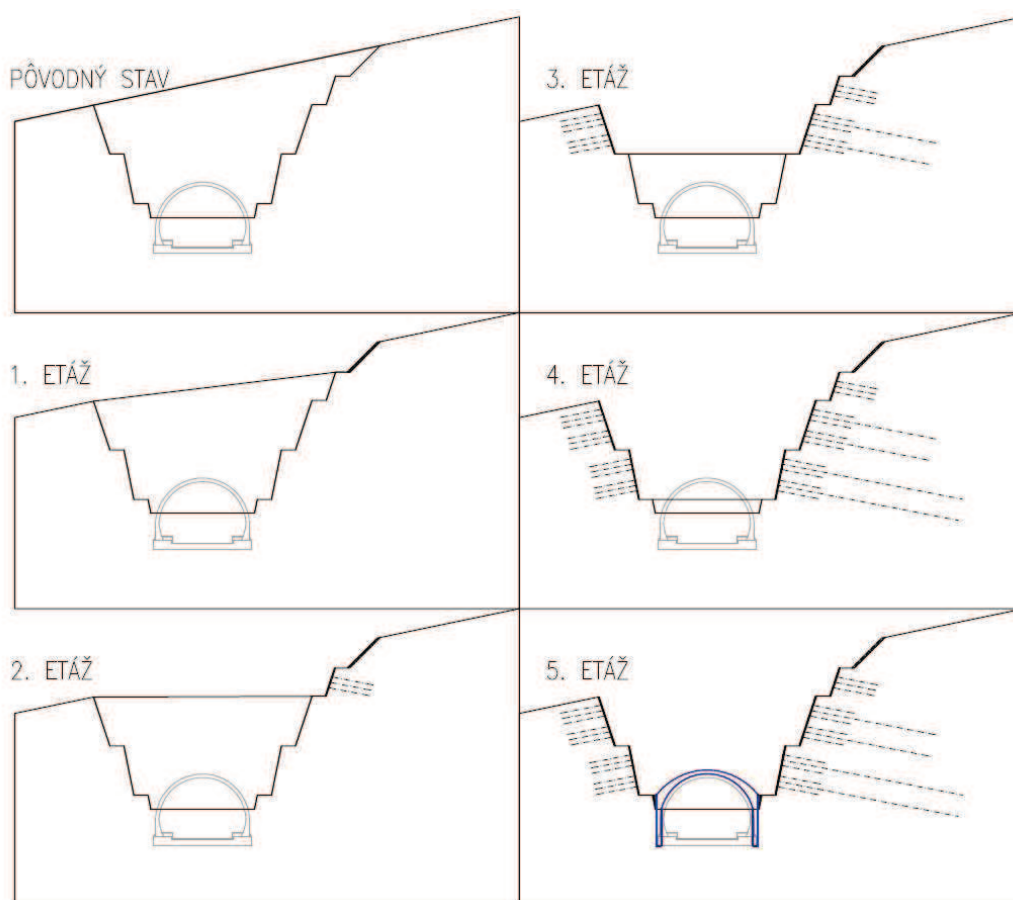
Tabuľka 7 Stupeň stability

6.5. Druhý spôsob zabezpečenia

6.5.1. Postup výpočtu

Podobne ako v prvom spôsobe zabezpečenia bola geometria stavebnej jamy najskôr navrhnutá v programe AutoCAD a následne importovaná do rozhrania programu GEO5.

Stavebná jama (Obr. 23) bola realizovaná postupným hĺbením a zaisťovaním portálovej steny v 5 etážach. Vyťaženie stavebnej jamy v tvare klenby bolo realizované až na dno budúcej konštrukcie korytnačky. Postup zárezov jednotlivých etáží výkopu a následných násypov v podobe zabezpečenia svahu bol realizovaný v rozdielnych fázach výpočtu.

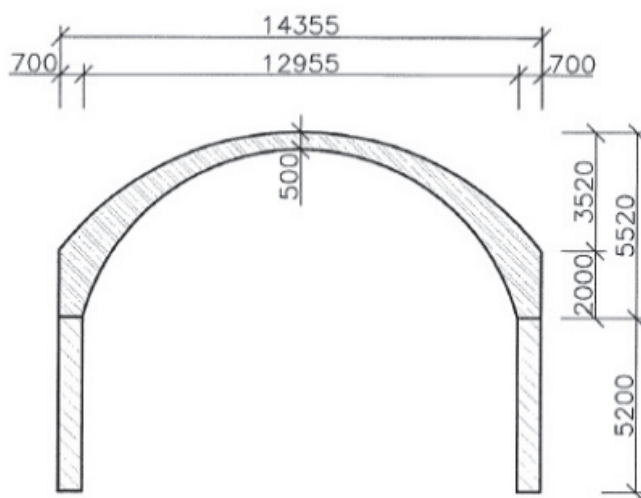


Obrázok 23 Postup výkopu a zabezpečenie pre 2. spôsob

6.5.2. Konštrukcia klenby

Klenbová konštrukcia korytnačky (Obr. 24) bola navrhnutá na zlepšenie stability svahov výkopu a následne ako ochrana pri razení pod ochranou stropu. Vonkajšie rozpätie klenby bolo približne 14,4 m a výška 5,52 m. Hrúbka klenby vo vrcholovom bode bola navrhnutá na 500 mm.

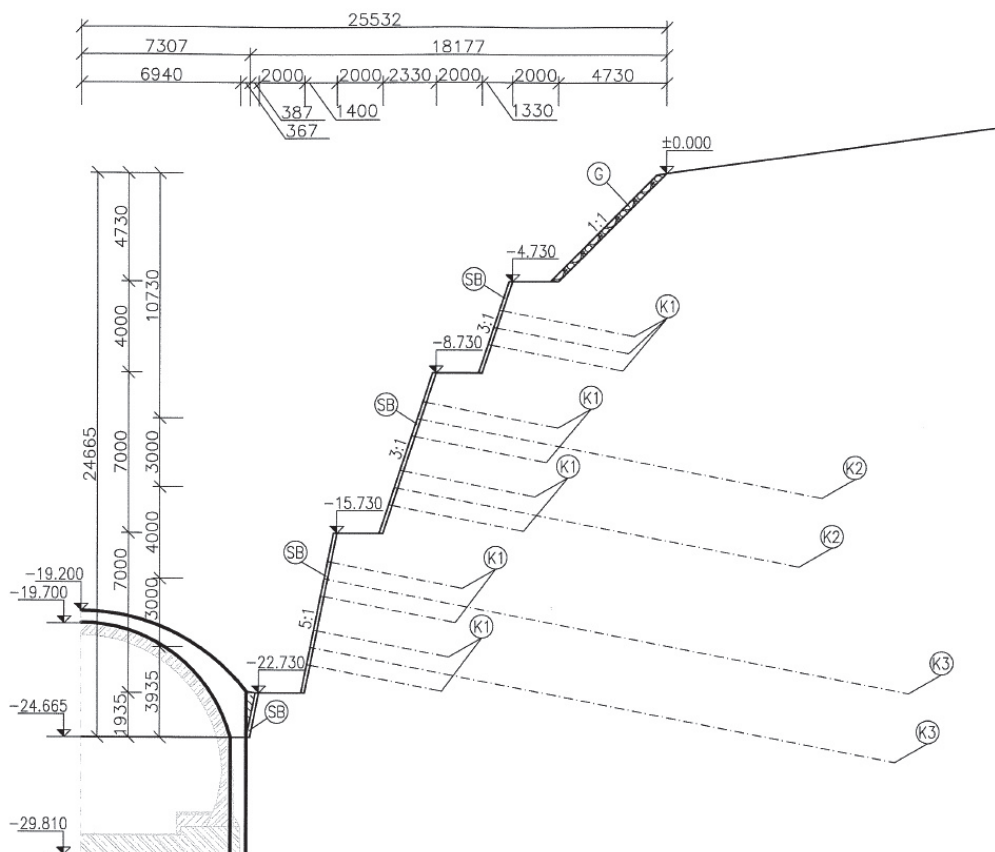
Klenba bola navrhnutá ako prefabrikovaná železobetónová konštrukcia osadená na bloky, ktoré boli vybetónované do hĺbky 5,2 m a následne bolo predpokladané spojenie blokov s klenbou pomocou oceľovej výstuže.



Obrázok 24 Geometria klenby

6.5.3. Pravý svah

Portálová stena (Obr. 25) bola realizovaná obdobne ako v prvom spôsobe. Zabezpečenie svahu bolo pomocou svahovania, striekaným betónom po prípade gabiónovými matracmi, horninovými klincami a lanovými kotvami, v poslednej fáze pomocou klenby.



Obrázok 25 Geometria pravého svahu

V prvej časti bol zvolený rovnaký spôsob zaistenia svahu ako v prvom návrhu zabezpečenia. Realizovaný bol teda svah so sklonom 1:1 a výškou 4,73 m. Zabezpečený bol gabiónovým matracom hrúbky 250 mm, ktorý bol istený pomocou krátkych kotiev.

Pod vrchnou časťou sa mení sklon svahu na sklon 3:1 s výškou 4,0 m. Svah bol v prvej etape zabezpečený striekaným betónom hrúbky 150 mm. Následne pomocou horninových klincov dĺžky 6,0 m so sklonom 11° od horizontály. Klinie boli navrhnuté v troch radoch a v pozdĺžnom smere vo vzdialenosti 1,0 m.

Tretia etáž výkopu bola navrhnutá rovnako v sklone 3:1 a o výške približne 7,0 m. Zabezpečenie stability steny prostredníctvom striekaného betónu hrúbky 150 mm. V náväznosti na vrstvu striekaného betónu boli osadené horninové klinec v štyroch radoch, vzdialené v pozdĺžnom smere 1,0 m, s dĺžkou 6,0 m a odklonom 11° od horizontály. Boli taktiež osadené v dvoch radoch lanové kotvy dĺžky 18,0 m, s priečnou osovou vzdialenosťou

3,0 m, v pozdĺžnom smere vzdialené 1,0 m a odklonom rovnako ako klinec 11° od horizontály.

V ďalšej časti výkopu bol zhotovený svah so sklonom 5:1 a výškou 7,0 m. Zaistenie stability bolo najskôr pomocou striekaného betónu hrúbky 150 mm. Následne boli vŕtané horninové klinec v štyroch radoch, vzdialené v pozdĺžnom smere 1,0 m, s dĺžkou 6,0 m a odklonom 11° od horizontály. Lanové kotvy s dĺžkou 26,0 m boli osadené rovnako ako v predošlej etáži, čiže s priečnou osovou vzdialenosťou 3,0 m, v pozdĺžnom smere vzdialené 1,0 m a sklonom 11° od horizontály.

Posledná etáž výkopu bola zhotovená vo výške skoro 2,0 m a opatrená nástrekom zo striekaného betónu. Boli vybudované betónové bloky do hĺbky 5,2 m a so šírkou 0,7 m. Etáž slúžila na uloženie prefabrikovanej konštrukcie klenby a previazane betónových blokov s klenbou pomocou výstuže. Zvyšný vzniknutý priestor medzi klenbou a svahom v poslednej etáži bol vyplnený betónom.

Špecifikácia horninových klinecov a lanových kotiev je uvedená v tabuľke číslo 8 a legenda tuhých prvkov vid'. tabuľka číslo 3. Jednotlivé časti steny boli rozdelené lavicami o šírke 2,0 m.

OZNAČENIE	POPIS	SILA V KOTVE [kN]	DĹŽKA [m]
K1	horninový klinec CKT φ 25,0 mm	390,00	6,00
K2	lanová kotva MCA-P 4 pramence φ 15,3 mm	620,00	18,00
K3	lanová kotva MCA-P 5 pramencov φ 15,3 mm	780,00	26,00

Tabuľka 8 Legenda horninových klinecov a lanových kotiev [19], [20]

Každý stupeň stability pre svah výkopu bol postupne v programe GEO5 vyhodnotený. Šmyková plocha bola určená pomocou optimalizácie pre jednotlivé stupne výkopu. Stupeň stability bol vždy spočítaný najprv pre svahovaný nezabezpečený výkop, pričom bez zabezpečenia vyhovoval výkop iba v prvej etáži, kedy bol svah v sklone 1:1 a na mierne zvýšenie stability bol použitý gabiónový matrac. Primárne bol výkop v druhej až

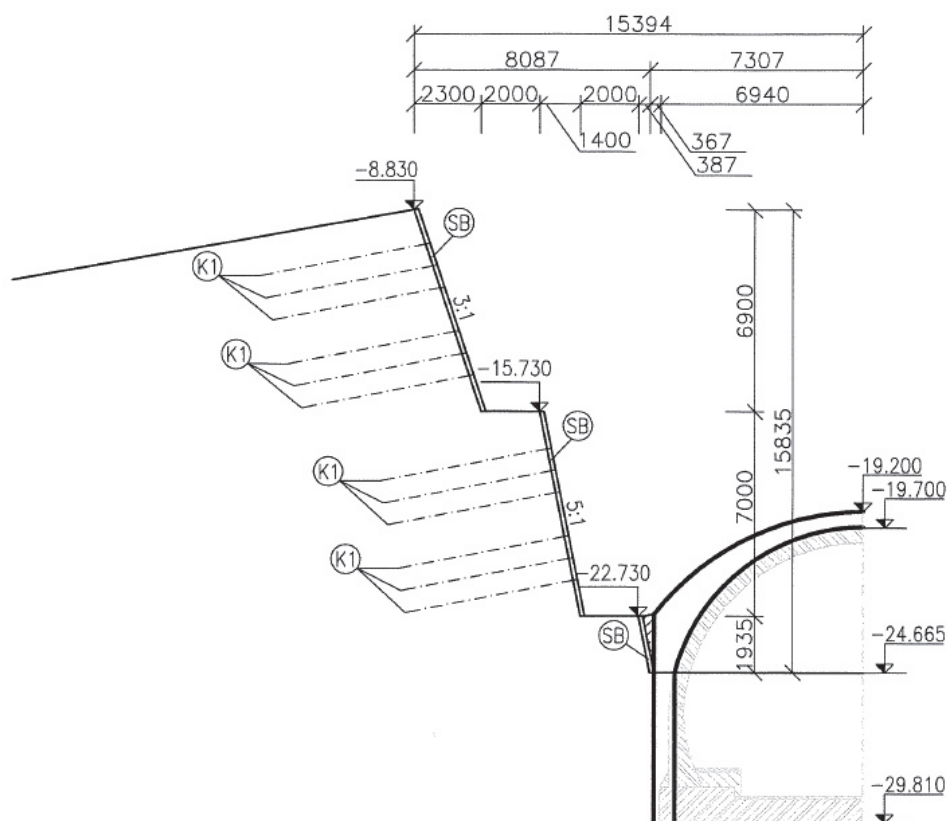
štvrtej etáži zabezpečený vždy striekaným betónom. Touto formou zabezpečenia však nebol dosiahnutý potrebný stupeň stability ani v jednej z hĺbených etáží. Z tohto dôvodu bol dodatočne výkop zabezpečený pomocou horninových klincov a lanových kotiev. V poslednej piatej etáži bol výkop zabezpečený striekaným betónom a v závere pomocou klenby. Jednotlivé stupne stability po celkovom zaistení jednotlivých etáží sú uvedené v tabuľke číslo 9.

	POSTUP VÝKOPU				
	1. etáž	2. etáž	3. etáž	4. etáž	5. etáž
STUPEŇ STABILITY	1,58	1,52	1,74	1,66	1,67
POSUDOK	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

Tabuľka 9 Stupeň stability

6.5.4. Ľavý svah

Realizácia svahu portálovej steny (Obr. 26) bola podobná ako v prvom spôsobe. Zabezpečenie svahu bolo prvotne pomocou svahovania v rôznych sklonoch, postupne zaistené striekaným betónom po prípade gabiónovými matracmi, horninovými klincami a lanovými kotvami, v poslednom kroku prispela k zaisteniu stability konštrukcia klenby.



Obrázok 26 Geometria ľavého svahu

Vrchná časť so sklonom 3:1 s výškou 6,9 m bola v prvej etape zabezpečená striekaným betónom hrúbky 150 mm. Následne pomocou horninových klinev dĺžky 6,0 m so sklonom 11° od horizontály. Klinec boli navrhnuté v šiestich radoch v pozdĺžnom smere so vzdialenosťou 1,0 m.

Druhý svah v sklone 5:1 a s výške približne 7,0 m bol zabezpečený prostredníctvom striekaného betónu hrúbky 150 mm. V druhom kroku boli umiestené horninové klinec v šiestich radoch s dĺžkou 6,0 m. Rozmiestenie klinev v pozdĺžnom smere bolo každý 1,0 m. Sklon klinev bol navrhnutý 11° od horizontály.

Posledný výkop bol zhotovený vo výške skoro 2,0 m a opatrený nástrekom zo striekaného betónu. Boli vybudované betónové bloky do hĺbky 5,2 m a so šírkou 0,7 m. Etáž slúžila na uloženie prefabrikovanej konštrukcie klenby a previazane betónových blokov s klenbou pomocou výstuže. Zvyšný vzniknutý priestor medzi klenbou a svahom v poslednej etáži bol vyplnený betónom.

Špecifikácia horninových klincov je uvedená v tabuľke číslo 10 a legenda tuhých prvkov vid'. tabuľka číslo 3. Jednotlivé časti steny boli rozdelené lavicami o šírke 2,0 m.

OZNAČENIE	POPIS	SILA V KOTVE [kN]	DĹŽKA [m]
K1	horninový klinec CKT ϕ 25,0 mm	390,00	6,00

Tabuľka 10 Legenda horninových klincov [20]

Pre jednotlivé svahy výkopu bola postupne v programe GEO5 počítaná optimalizovaná šmyková plocha a následne určený stupeň stability najskôr pre svahovaný nezabezpečený výkop, kde nebolo dosiahnuté požadovaného stupňa stability v žiadnej etáži výkopu. V prvom kroku bol výkop v tretej a štvrtej etáži zabezpečený striekaným betónom. Touto formou zabezpečenia však nebol dosiahnutý potrebný stupeň stability ani v jednej z hĺbených etáží. Z tohto dôvodu bol dodatočne výkop zabezpečený pomocou horninových klincov. Týmto zabezpečením bol dosiahnutý požadovaný stupeň stability. V poslednej piatej etáži bol výkop zabezpečený striekaným betónom a v závere pomocou klenby. Jednotlivé stupne stability po celkovom zaistení jednotlivých etáží pravého svahu sú uvedené v tabuľke číslo 11.

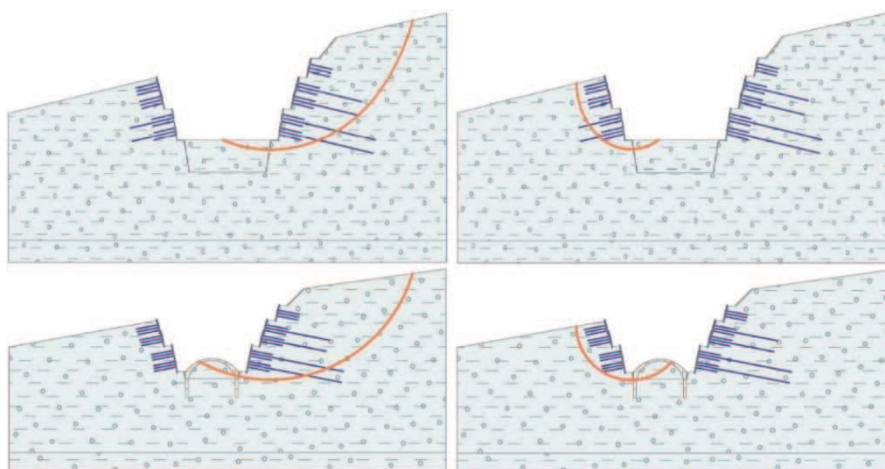
	POSTUP VÝKOPU				
	1. etáž	2. etáž	3. etáž	4. etáž	5. etáž
STUPEŇ STABILITY	-	-	2,00	1,51	3,34
POSUDOK	-	-	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

Tabuľka 11 Stupeň stability

6.6. Porovnanie stability svahu pre dva spôsoby zaistenia portálu

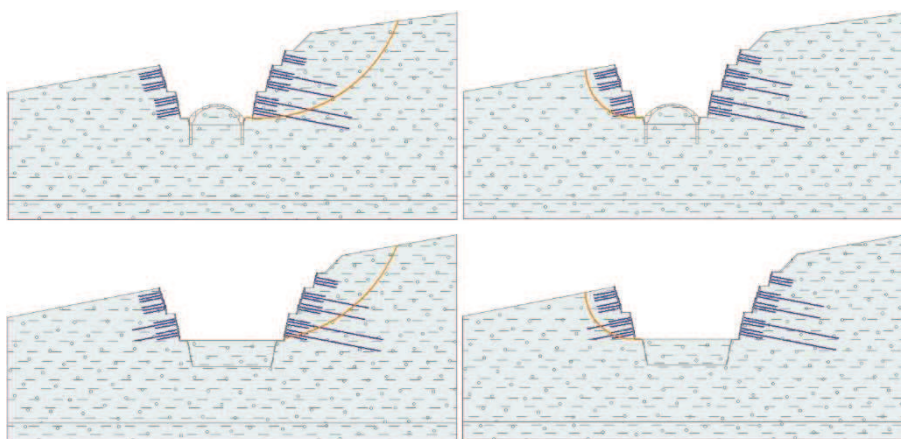
Vypočítané parametre optimalizovanej šmykovej plochy v štvrtej etáži prvého spôsobu zabezpečenia boli pre porovnanie vložené do výpočtu štandardnej šmykovej plochy

v konečnej etáži druhého návrhu (Obr. 27). Stupeň stability bol určený pre pravý aj ľavý svah aby bolo možné porovnať oba spôsoby zabezpečenia.



Obrázok 27 Porovnávané šmykové plochy výkopu

Rovnako boli tiež parametre optimalizovanej šmykovej plochy, ktorá prechádzala päťou svahu v konečnej etáži návrhu pre druhý spôsob zabezpečenia, vložené do výpočtu štandardnej šmykovej plochy v štvrtej etáži prvého návrhu (Obr. 28). Pre porovnanie bol určený stupeň stability pre pravý aj ľavý svah.



Obrázok 28 Porovnávané šmykové plochy

V tabuľke číslo 12 sú zaznamenané rozdielne hodnoty v počítaných stupňoch stability pre oba spôsoby. Bolo preukázané, že zaistenie stability svahu v druhom spôsobe a teda s použitím konštrukcie klenby, výrazne prispelo k zvýšeniu stupňa stability. Jedným z dôvodov zvýšenia stability bol fakt, že šmyková plocha prechádza betónovým blokom

a konštrukciou klenby. Práve preto túto skutočnosť výpočet preukázal tak veľký rozdiel v stabilite svahu. Rovnako aj porovnaním optimalizovanej šmykovej plochy v druhom návrhu a rovnakými parametrami šmykovej plochy v prvom návrhu bolo preukázane malé zvýšenie stupňa stability pri pravom svahu. Pri ľavom svahu však stupeň stability klesol a to z dôvodu, že neboli v druhom návrhu použité na zabezpečenie lanové kotvy.

	TYP VÝPOČTU	STUPEŇ STABILITY	
		pravý svah	ľavý svah
1. SPÔSOB ZABEZPEČENIA	OPTIMALIZÁCIA	1,55	1,79
2. SPÔSOB ZABEZPEČENIA		1,67	3,34
1. SPÔSOB ZABEZPEČENIA	ŠTANDARD	2,50	2,29
2. SPÔSOB ZABEZPEČENIA		7,17	17,17

Tabuľka 12 Porovnanie stupňa stability

Jednou z výhod druhého spôsobu bol objem zemných prác spojených s hĺbením stavebnej jamy, čo súviselo aj so zmenšením oblasti postihnutej výstavbou. Objem zemných prác bol stanovený v pozdĺžnom smere na 1,0 m. V druhom spôsobe zabezpečenia bol objem zemných prác menší približne o 290 m³. V tabuľke číslo 13 sú pre porovnanie uvedené objemy zemných prác pri jednotlivých spôsoboch.

	OBJEM ZEMNÝCH PRÁC [m ³]
1. SPÔSOB ZABEZPEČENIA	799,22
2. SPÔSOB ZABEZPEČENIA	510,75

Tabuľka 13 Porovnanie objemu výkopu

Ďalšou výhodou je zníženie počtu kotiev potrebných k zabezpečeniu stability. Pri druhom spôsobe zabezpečenia neboli potrebné pri hĺbení štvrtej etáže ľavého svahu lanové kotvy, nakoľko k dosiahnutiu potrebného stupňa stability postačovalo zabezpečenie pomocou horninových klincov a striekaného betónu. Rovnako bola vylúčená spotreba horninových klincov a lanových kotiev v prípade, že by bol tunel vyhlbený až na dno.

V prípade použitia klenby bolo nutné uvažovať zo zvýšením spotreby železobetónu. Objem betónu, ktorý bol potrebný na zhotovenie 1,0 m klenby predstavoval okolo 16,03 m³.

7. Záver

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo priblíženie kombinovanej metódy výstavby pri zhotovení portálových častí tunelov. Neoddeliteľnou súčasťou tejto metódy je stavebná jama, ktorej svahy musia byť dostatočne zabezpečené, pokiaľ nedôjde k osadeniu klenby a následne k zásypu výkopu. Práve rôzne spôsoby zaistenia stability svahu stavebnej jamy boli objasnené v prvej časti mojej práce.

Poruchy portálov tunelov v čase výstavby, zmeny projektov na základe skutočného chovania hornín v mieste navrhnutého portálu a rôzne iné nestability boli uvedené v ďalšej kapitole na konkrétnych príkladoch tunelov.

Tretia časť práce bola sústredená na kombinovanú metódu výstavby, ktorá spočíva vo vyhlbení stavebnej jamy, osadení stropnej konštrukcie a následnom razení už pod ochranou klenby. Pre úplnosť boli uvedené aj ďalšie metódy možnosti realizácie podzemných diel ako je razenie, hĺbenie a rôzne špeciálne metódy, ktoré sú v dnešnej dobe bežne používané.

V praktickej časti bola venovaná pozornosť samotnému zaisteniu stability svahu v oblasti portálu. Prvý spôsob návrhu spočíval v postupnom zabezpečení jednotlivých etáží výkopu pomocou stabilizačných prvkov ako boli striekaný betón, gabiónové matrace, horninové klnce a lanové kotvy. Keďže tunel bol navrhnutý ako hĺbený, stavebná jama bola vyhlbená až na päť tunelu. Pre jednotlivé stupne výkopu bola v závislosti na zabezpečení pomocou programu GEO5 určená optimalizovaná šmyková plocha podľa Bishopa. Zabezpečenie bolo navrhnuté tak, aby spĺňovalo požadovaný minimálny stupeň stability 1,5.

Druhý spôsob bol realizovaný ako kombinovaná metóda, čiže stavebná jama bola vyhlbená len po úroveň klenby tunela. Týmto návrhom bol zmenšený objem výkopu a spotreba stabilizačných prvkov, ale naopak bola zvýšená spotreba materiálu na zhotovenie klenby. Návrh výkopu a stabilizácie jednotlivých etáží bol podobný ako v prvom spôsobe. Pre jednotlivé etáže výkopu bola určená v programe GEO5 podľa Bishopa optimalizovaná šmyková plocha a zabezpečenie bolo navrhnuté tak, aby som dosiahlo požadovaný stupeň stability 1,5.

Záver práce bol zameraný na porovnanie dvoch návrhov zabezpečenia stavebnej jamy a teda aj dvoch rozličných metód zvolených na realizáciu tunela. Vybrané parametre optimalizovanej šmykovej plochy z štvrtej etáže prvého spôsobu boli vložené pre porovnanie do konečnej etáže druhého návrhu, kedy bola osadená už aj klenba tunela. Týmto krokom bolo preukázané, že klenba mala pozitívne účinky na zvýšenie stability svahu portálu nakoľko stupeň stability vzrástol pri pravom svahu o 5,62 a pri ľavom svahu o 15,38 jednotiek. Treba však podotknúť, že šmyková plocha s týmito parametrami prechádzala klenbou tunela a rovnako aj betónovými blokmi, na ktorých bola klenba osadená. Rovnako boli aj parametre optimalizovanej šmykovej plochy z konečnej etáže druhého návrhu pre porovnanie importované do štandardného výpočtu v štvrtej etáži prvého návrhu. Týmto porovnaním bol preukázaný nárast stupňa stability v prvom spôsobe zabezpečenia pri pravom svahu o 0,83 jednotiek. Naopak pri ľavom svahu stupeň stability klesol o 1,05 jednotiek, rozdiel bol spojený s použitým lanových kotiev pri prvom návrhu zabezpečenia.

Mojou prácou som si rozšírila prehľad o možnosti realizácie podzemných diel metódou korytnačka, rovnako aj rôznych spôsoboch zaistenia stability svahu. Návrhom geometrie stavebnej jamy, zabezpečenia a celým výpočtom v programe GEO5 som si doplnila znalosti práce v tomto programe.

8. Zoznam použitej literatúry

- [1] TURČEK, Peter. *Zakladanie stavieb*. 2. rozš. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga group, 2004. ISBN 80-88905-99-0.
- [2] KLEPSATEL, František, Libor MAŘÍK a Miloslav FRANKOVSKÝ. *Městské podzemní stavby*. Bratislava: Jaga, 2005. ISBN 80-8076-021-7.
- [3] KLEPSATEL, František, Pavol KUSÝ a Alojz KOPÁČIK. *Podzemné stavby I: Metódy tunelovania*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1998. Edícia skript. ISBN 80-227-1028-8.
- [4] KLEPSATEL, František a Peter TURČEK. *Podzemné stavby I*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2005. Edícia skript. ISBN 80-227-2273-1.
- [5] MASOPUST, Jan. *Speciální zakládání staveb I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2770-1.
- [6] MASOPUST, Jan. *Speciální zakládání staveb II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 80-7204-489-3.
- [7] *Problematika tunelových portálů v sesuvných územích* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:
http://www.pragoprojekt.cz/data/File/Novosad_cz_0736ID_363.pdf
- [8] *Technické řešení pražského portálu tunelu Prackovice na dálnici D8 přes České středohoří* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:
http://www.pragoprojekt.cz/data/File/Technicke%20reseni%20Prazskeho%20portal_u%20tunelu%20Prackovice.pdf
- [9] *Tunel prackovice na dálnici D8 – Realizace pražského portálu* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:
http://www.pragoprojekt.cz/data/File/Technicke%20reseni%20Prazskeho%20portal_u%20tunelu%20Prackovice.pdf
- [10] *Tunel Bancarevo – Srbsko* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:
http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2014/4/tunel_4_14-05.pdf
- [11] *Ružomerský tunel zbrzdila nad Váhom sila prírody* [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:
<http://spravy.pravda.sk/ekonomika/clanok/402612-ruzomersky-tunel-zbrzdila-nad-vahom-sila-prirody/>

- [12] *Tunel Žilina – Skúsenosti s razením tunela v náročných geologických podmienkach.* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z:
<https://www.asb.sk/inzinierske-stavby/tunely/tunel-zilina-skusenosti-s-razenim-tunela-v-narocnych-geologickych-podmienkach>
- [13] *Tunel Žilina – Projektovanie, výstavba a geotechnický monitoring.* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z:
http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2015/150902_tunel.pdf
- [14] *Tunel Višňové.* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z:
<https://www.asb.sk/inzinierske-stavby/tunely/tunel-visnove>
- [15] *Tunel Klimkovice 1.* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z:
<https://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/tunely/tunel-klimkovice-1>
- [16] *Tunel Klimkovice 2.* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z:
<https://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/tunely/tunel-klimkovice-2>
- [17] *Oficiálny začiatok razenia tunela Višňové.* [online]. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z:
<http://zilinskedialnice.sk/oficialny-zaciatok-razenia-tunela-visnove/>
- [18] *Manuál softwaru GEO5.* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z:
<http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/pouzivani-napovedy-01/>
- [19] *Technický list – Lanové kotvky MCA-P.* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z:
<http://www.minova.cz/download/2015/technicke-listy/sk/tl-lanove-kotvy-mca-p-sk.pdf>
- [20] *Technický list – Celozávitové kotevné tyče CKT.* [online]. [cit. 2017-04-09].
Dostupné z:
<http://www.minova.cz/download/2015/technicke-listy/sk/tl-celozavitove-kotevni-tyce-ckt-sk.pdf>
- [21] FALTÝNEK, Jan a VYDROVÁ, Linda. Praktická aplikace získaných poznatků při modelování konstrukce želvy pro bezpečné zajištění a následnou ražbu v oblasti západního portálu tunelu Považský Chlmec. In: *Zpěvňování, těsnění a kotvení horninového masivu a stavebních konstrukcí.* Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2017, s. 30-38. ISBN 978-80-4014-7.

9. Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Príklady usporiadania portálov [4]	10
Obrázok 2 Zníženie HPV odvodňovacou štôľňou a vertikálnymi vrtmi [4]	13
Obrázok 3 Schéma záporového paženia [6]	13
Obrázok 4 Statické pôsobenie pilotovej steny [1]	15
Obrázok 5 Pôdorysné usporiadanie pilotovej steny [1]	16
Obrázok 6 Schéma realizácie tryskovej injektáže [5]	18
Obrázok 7 Mikropilótové steny [6]	19
Obrázok 8 Schéma mikropilótovej steny [6]	19
Obrázok 9 Schéma injektovanej horninovej kotvy [5]	21
Obrázok 10 Schéma pracovného postupu klincovaného svahu [6]	22
Obrázok 11 Pohľad na zaistenie pražského portálu [8]	24
Obrázok 12 Zabezpečenie svahu [16]	25
Obrázok 13 Pohľad portál tunela Višňové [17]	26
Obrázok 14 Pohľad na portál tunela Žilina [13]	27
Obrázok 15 Zmena trasy tunela [11]	29
Obrázok 16 Západný portál tunela [10]	29
Obrázok 17 Príklady využitia vrchnákovej metódy výstavby [4]	32
Obrázok 18 Metóda korytnačka [3]	33
Obrázok 19 Statická schéma - Bishopova metóda [18]	36
Obrázok 20 Postup výkopu a zabezpečenia pre 1. spôsob	38
Obrázok 21 Geometria pravého svahu	39
Obrázok 22 Geometria ľavého svahu	42
Obrázok 23 Postup výkopu a zabezpečenie pre 2. spôsob	44
Obrázok 24 Geometria klenby	45
Obrázok 25 Geometria pravého svahu	46
Obrázok 26 Geometria ľavého svahu	49
Obrázok 27 Porovnávané šmykové plochy výkopu	51
Obrázok 28 Porovnávané šmykové plochy	51

10. Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Charakteristiky návrhového prostredia	37
Tabuľka 2 Charakteristiky ostatných materiálov	37
Tabuľka 3 Legenda tuhých prvkov	40
Tabuľka 4 Legenda horninových klincov a lanových kotiev [19], [20]	41
Tabuľka 5 Stupeň stability	41
Tabuľka 6 Legenda horninových klincov a lanových kotiev [19], [20]	43
Tabuľka 7 Stupeň stability	43
Tabuľka 8 Legenda horninových klincov a lanových kotiev [19], [20]	47
Tabuľka 9 Stupeň stability	48
Tabuľka 10 Legenda horninových klincov [20]	50
Tabuľka 11 Stupeň stability	50
Tabuľka 12 Porovnanie stupňa stability	52
Tabuľka 13 Porovnanie objemu výkopu.....	52

11. Zoznam príloh

Príloha číslo 1	<i>Prvý spôsob zabezpečenia.</i> Vstupné parametre do výpočtu v programe GEO5
Príloha číslo 2	<i>Prvý spôsob zabezpečenia.</i> Výstupy šmykových plôch a posudok stupňa stability jednotlivých etáží z programu GEO5
Príloha číslo 3	<i>Druhý spôsob zabezpečenia.</i> Vstupné parametre do výpočtu v programe GEO5
Príloha číslo 4	<i>Druhý spôsob zabezpečenia.</i> Výstupy šmykových plôch a posudok stupňa stability jednotlivých etáží z programu GEO5